

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

SEUILS PLUVIOMÉTRIQUES POUR LE DÉCLENCHEMENT DE GLISSEMENTS DE  
TERRAIN DANS LA MUNICIPALITÉ D'ANGRA DOS REIS, RIO DE JANEIRO,  
BRÉSIL

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

SÉBASTIEN ROY

MAI 2015

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»



## REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord et avant tout remercier mon directeur de maîtrise, Daniel Germain, sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour. Ton support, tes conseils judicieux, ta grande disponibilité et ta venue sur le terrain au Brésil ont été grandement appréciés durant ces deux longues années. En espérant retravailler avec toi dans le futur!

Un gros merci revient à mon codirecteur non officiel, Antônio José Teixeira Guerra, qui a accepté de m'aider dans la réalisation de ce mémoire et qui m'a consacré beaucoup de temps durant mon séjour en sol brésilien. Ta passion pour la géomorphologie et ta gentillesse resteront à jamais gravées dans ma mémoire. *Obrigado!*

Je tiens également à remercier le personnel du département de géographie de l'UQAM et de l'*Universidade Federal do Rio de Janeiro* (UFRJ) pour le support technique et logistique offert. Un gros merci revient aussi à mes collègues de l'UQAM pour qui j'ai le plus grand respect. Merci à Louis Bouchard, Jean-François Milot, Mathieu Gratton, Stéphanie Morin, Annie-Claude Robitaille et Annie Lagadec pour vos conseils, votre amitié et votre support moral inestimable!

Merci au *Secretaria Especial de Defesa Civil e Trânsito* de la municipalité d'Angra dos Reis et plus particulièrement à Pedro França d'avoir autorisé ce projet, de m'avoir fourni toutes les données nécessaires à sa réalisation et de m'avoir fait visiter les principales zones affectées par les glissements de terrain. Cette excursion fut inoubliable!

Je tiens à souligner le soutien financier offert par les organismes subventionnaires du CRSNG et du FQRNT qui m'ont permis de réaliser ce projet de maîtrise sans me soucier de mon compte en banque et, par conséquent, de m'y concentrer à temps plein.

Je suis également extrêmement reconnaissant envers ma famille, ma belle-famille et mes amis pour leur support, leur écoute et leurs conseils. J'aimerais remercier tout particulièrement Luis Paulo de m'avoir accueilli chez lui durant mes quatre mois au Brésil. Merci de m'avoir accepté au sein de ta famille, de m'avoir présenté à tes amis, de m'avoir fait visiter l'une des plus belles villes au monde et d'être devenu un aussi bon ami. Tu es quelqu'un d'exceptionnel!

Un merci tout spécial à ma douce, Élisabeth Jacques sans qui je n'y serais jamais parvenu. Merci d'avoir cru en moi, de toujours avoir été là pour moi et de m'avoir enduré pour le meilleur et pour le pire. Je t'aime plus que tout au monde!

Finalement, j'aimerais dédier ce mémoire à ma mère, Mireille Comeau, qui nous a quittés il y a de cela 25 ans et qui, je crois, aurait été très fière de moi.

## TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES .....	xv
LISTE DES SYMBOLES.....	xvi
RÉSUMÉ .....	xvii
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I.....	7
REVUE DE LITTÉRATURE.....	7
1.1 La notion de seuil pluviométrique .....	7
1.2 Typologie des approches.....	8
1.2.1 Approche empirique .....	9
1.3 Principaux constats .....	13
1.3.1 Valeurs seuils.....	13
1.3.2 Influence des précipitations antécédentes.....	15
1.3.3 Normalisation des seuils .....	15
1.3.4 Aspects méthodologiques .....	16
1.3.5 Influence des facteurs géographiques .....	16
CHAPITRE II .....	20
LOCALISATION ET DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE .....	20
2.1 Localisation des sites d'étude .....	20
2.1.1 Échelle régionale .....	20
2.1.2 Échelle locale.....	21
2.2 Caractérisation des sites d'étude .....	22
2.2.1 Contexte géologique .....	22
2.2.2 Contexte géomorphologique.....	25
2.2.3 Contexte climatique.....	30
2.2.3 Occupation du sol .....	31

CHAPITRE III .....	33
MÉTHODOLOGIE.....	33
3.1 Données pluviométriques.....	33
3.1.1 Identification des régions pluviométriques.....	35
3.1.2 Traitements des données.....	37
3.2 Base de données des glissements de terrain.....	38
3.2.1 Validation et caractérisation des glissements de terrain .....	38
3.3 Évaluation empirique des conditions pluviométriques liées aux glissements.....	39
3.3.1 Seuils de durée de l'épisode pluviométrique ( <i>ED</i> ) .....	39
3.3.2 Précipitations antécédentes .....	40
3.4 Évaluation probabiliste des conditions pluviométriques associées aux glissements ...	41
CHAPITRE IV .....	44
RÉSULTATS.....	44
4.1 Régime des précipitations et occurrence des événements pluviométriques.....	44
4.2 Fréquence et occurrence des glissements de terrain .....	48
4.2.1 À l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis .....	48
4.2.2 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements journaliers .....	54
4.2.3 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements aux 15 minutes.....	57
4.3 Seuils pluviométriques de déclenchement des glissements de terrain .....	58
4.3.1 Seuils de durée de l'épisode pluviométrique ( <i>ED</i> ) .....	58
4.3.2 Seuils <i>ED</i> probabilistes.....	64
4.3.3 Seuils <i>ED</i> normalisés par la <i>MAP</i> ( <i>E<sub>MAPD</sub></i> ).....	71
4.3.4 Seuils <i>ED</i> établis en fonction des caractéristiques biophysiques.....	74
4.3.5 Seuils basés sur les précipitations antécédentes .....	92
CHAPITRE V .....	111
DISCUSSION .....	111
5.1 Dynamique spatio-temporelle des glissements de terrain.....	111
5.1.1 Dynamique temporelle.....	111
5.1.2 Dynamique spatiale .....	118
5.2 Conditions pluviométriques pour l'occurrence de glissements de terrain .....	123
5.2.1 Conditions basées sur la durée des événements pluviométriques ( <i>ED</i> ).....	123
5.2.2 Conditions <i>E-D</i> probabilistes.....	140

5.2.3 Conditions <i>E-D</i> normalisés par la <i>MAP</i> .....	144
5.2.4 Influence des facteurs environnementaux.....	148
5.2.5 Influence des précipitations antécédentes.....	158
5.3 Limites de la recherche .....	164
CONCLUSION.....	167
RÉFÉRENCES .....	171

## LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Principaux seuils de durée de l'épisode pluviométrique (ED) établis dans le Monde.....	14
2.1 Carte de localisation de la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) (S 23° 00' 33"; O 44° 19' 06") et ses districts à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).....	20
2.2 Carte de localisation du centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) (S 23° 00' 33"; O 44° 19' 06") et ses quartiers à des fins d'analyse locale (Fond : IBGE, 2014).....	21
2.3 Carte lithologique de la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).....	23
2.4 Carte lithologique du centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).....	24
2.5 Modèle numérique d'élévation pour la municipalité d'Angra dos Reis à des fins d'analyse régionale (Fond : INEA, 2013).....	26
2.6 Carte illustrant l'angle des pentes (en degrés) dans la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).....	27
2.7 Modèle numérique d'élévation pour le centre urbain d'Angra dos Reis à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).....	28
2.8 Carte illustrant l'angle des pentes (en degrés) dans le centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).....	28
2.9 Carte illustrant l'orientation des pentes dans la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).....	29
2.10 Carte illustrant l'orientation des pentes dans le centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).....	29
2.11 Carte illustrant l'occupation du sol dans la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).....	32



2.12	Carte illustrant l'occupation du sol dans le centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).....	32
3.1	Localisation et aire d'influence des stations pluviométriques situées dans la municipalité d'Angra dos Reis avant l'agrégation des données (Fond : IBGE, 2014).....	35
3.2	Régions pluviométriques identifiées (Mambucaba, Bracuí, Serra D'água, Japuiba Jacuecanga et Angra dos Reis) après l'agrégation des séries de données et des aires d'influence (Fond : IBGE, 2014).....	36
4.1	Précipitations annuelles (mm) enregistrées par les six régions pluviométriques entre 2008 et 2013.....	45
4.2	Précipitations moyennes mensuelles (mm) enregistrées par chacune des six régions pluviométriques entre 2008 et 2013.....	45
4.3	Répartition des événements pluviométriques ayant déclenché ou non des glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis, en fonction de la région pluviométrique, et dans le centre urbain selon la période d'étude (janvier 2008 à mars 2013 et mai 2011 à juin 2013).....	46
4.4	Variabilité annuelle des événements pluviométriques déclencheurs et non-déclencheurs dans la municipalité d'Angra dos Reis (M), le centre urbain (C.U.) et le centre urbain pour la période du 18 mai 2011 au 30 juin 2013 (C.U.15).....	47
4.5	Variabilité mensuelle des événements pluviométriques déclencheurs et non-déclencheurs dans la municipalité d'Angra dos Reis (M), le centre urbain (C.U.) et le centre urbain pour la période du 18 mai 2011 au 30 juin 2013 (C.U.15).....	48
4.6	Répartition spatiale (%) des 1640 glissements de terrain déclenchés par les pluies dans la municipalité d'Angra dos Reis entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 (Fond : IBGE, 2014).....	49
4.7	Variabilité annuelle des glissements initiés par les pluies dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (données journalières et aux 15 minutes).....	51
4.8	Variabilité saisonnière (nombre et pourcentage) des glissements déclenchés lors d'événements pluviométriques dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis (données journalières et aux 15 minutes).....	51

4.9	Variabilité mensuelle des glissements de terrain déclenchés par les pluies dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (données journalières et aux 15 minutes).....	52
4.10	Répartition (nombre et pourcentage) inter-annuelle (2008 à 2013) des glissements de terrain déclenchés lors d'évènements pluviométriques dans les six régions pluviométriques de la municipalité d'Angra dos Reis (Mambucaba, Bracuí, Serra D'água, Japuiba, Angra dos Reis et Jacuecanga).....	53
4.11	Répartition (%) des glissements de terrain ayant été déclenchés lors d'évènements pluviométriques dans la municipalité d'Angra dos Reis entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 en fonction des données biophysiques.....	54
4.12	Localisation des 526 glissements de terrain déclenchés lors d'un épisode pluviométrique dans le centre urbain d'Angra dos Reis entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).....	55
4.13	Répartition (%) des 526 glissements de terrain ayant été déclenchés lors d'évènements pluviométriques dans le centre urbain d'Angra dos Reis entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 en fonction des données biophysiques.....	56
4.14	Localisation des 98 glissements de terrain déclenchés par les pluies dans le centre urbain d'Angra dos Reis entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).....	57
4.15	Seuil ED minimum (5 %) établi pour la municipalité d'Angra dos Reis à partir de 1640 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.....	59
4.16	Seuil ED minimum (5 %) établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 526 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.....	60
4.17	Seuil ED minimum (5 %) établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 98 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013.....	61
4.18	Seuils ED minimum (5 %) établis en fonction des régions pluviométriques dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	63
4.19	Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis en fonction des variables E et D.....	67

4.20	Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis en fonction des variables E et D.....	69
4.21	Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis en fonction des variables E et D (enregistrements aux 15 minutes).....	71
4.22	Seuil $E_{MAPD}$ minimum (5 %) établi pour la municipalité d'Angra dos Reis à partir de 1640 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.....	72
4.23	Seuil $E_{MAPD}$ minimum (5 %) établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 526 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.....	73
4.24	Seuil $E_{MAPD}$ minimum (5 %) établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 98 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013.....	74
4.25	Seuils ED minimums (5 %) établis pour divers domaines lithologiques dans la municipalité d'Angra dos Reis à partir de 1640 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.....	75
4.26	Seuils ED minimums (5 %) établis pour divers domaines lithologiques dans le centre urbain Angra dos Reis à partir de 526 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.....	77
4.27	Seuils ED minimums (5 %) établis pour divers domaines lithologiques dans le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 98 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013.....	78
4.28	Seuils ED minimums (5 %) établis pour divers angles de pente à partir de 1640 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	79
4.29	Seuils ED minimums (5 %) établis pour divers angles de pente à partir de 526 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.....	81
4.30	Seuils ED minimums (5 %) établis pour divers angles de pente à partir de 98 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.....	83



4.31	Seuils ED minimums (5 %) établis pour diverses orientations de pente à partir de 1640 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	85
4.32	Seuils ED minimums (5 %) établis pour diverses orientations de pente à partir de 526 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.....	86
4.33	Seuils ED minimums (5 %) établis pour diverses orientations de pente à partir de 98 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.....	87
4.34	Seuils ED minimums (5 %) établis pour diverses occupations du sol à partir de 1598 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	88
4.35	Seuils ED minimums (5 %) établis pour diverses occupations du sol à partir de 514 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.....	90
4.36	Seuils ED minimums (5 %) établis pour diverses occupations du sol à partir de 93 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.....	91
4.37	Relation entre les précipitations antécédentes cumulées (3, 5, 10, 15 et 30 jours) avant la journée de déclenchement et les précipitations journalières au moment de la rupture pour 1640 glissements de terrain survenus entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	93
4.38	Seuil minimum (5 %) basé sur les précipitations antécédentes cumulées 15 jours avant la journée de déclenchement et établi pour la municipalité d'Angra dos Reis à partir de 1640 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique et 950 événements pluviométriques n'ayant pas déclenchés de glissements de terrain (cercles blancs) entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.....	96
4.39	Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis en fonction des variables R et A <sub>15j</sub> . Les probabilités ont été établies à partir de 1640 glissements initiés lors d'événements pluviométriques et 950 événements non-déclencheurs répertoriés entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.....	97

4.40	Relation entre les précipitations antécédentes cumulées (3, 5, 10, 15 et 30 jours) avant la journée de déclenchement et les précipitations journalières au moment de la rupture pour 526 glissements de terrain survenus entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.....	99
4.41	Seuil minimum (5 %) basé sur les précipitations antécédentes cumulées 15 jours avant la journée de déclenchement et établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 526 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique et 105 événements pluviométriques n'ayant pas déclenchés de glissements de terrain (cercles blancs) entre le 1 <sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.....	102
4.42	Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis en fonction des variables R et A <sub>15j</sub> .....	103
4.43	Relation entre les précipitations antécédentes cumulées (3, 5, 10, 15 et 30 jours) avant la journée de déclenchement et les précipitations journalières au moment de la rupture pour 98 glissements de terrain survenus entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.....	105
4.44	Seuil minimum (5 %) basé sur les précipitations antécédentes cumulées 30 jours avant la journée de déclenchement et établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 98 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique et 100 événements pluviométriques n'ayant pas déclenchés de glissements de terrain (cercles blancs) entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013.....	108
4.45	Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis en fonction des variables R et A <sub>30j</sub> .....	110
5.1	Exemples de mouvements gravitaires dans les falaises adjacentes au quartier Sapinhatuba I (Photos : juin 2013).....	115
5.2	Répercussions visibles des mouvements de reptation dans le secteur Sapinhatuba I (Photos : juin 2013).....	116
5.3	Comparaison des seuils ED minimum (5 %) établis pour la municipalité d'Angra dos Reis, le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes) et les six régions pluviométriques (Mambucaba, Bracuí, Serra D'água, Japuiba, Angra dos Reis et Jacuecanga).....	125
5.4	Comparaison des seuils ED minimum (5 %) établis dans cette étude et dans la littérature scientifique.).....	131

5.5	Comparaison des seuils $E_{MAPD}$ minimum (5 %) établis pour la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes).....	145
5.6	Comparaison des seuils $E_{MAPD}$ minimum (5 %) établis dans cette étude et dans la littérature scientifique.....	146
5.7	Seuils ED minimums (5 %) établis pour divers domaines lithologiques dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes).....	150
5.8	Seuils ED minimums (5 %) établis pour divers angles de pente dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes).....	152
5.9	Seuils ED minimums (5 %) établis pour diverses orientations de pente dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes).....	154
5.10	Seuils ED minimums (5 %) établis pour diverses occupations du sol dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes).....	157

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Description des unités lithologiques présentes dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	23
3.1 Informations sur les stations pluviométriques employées dans cette étude à des fins d'analyse locale et régionale.....	34
3.2 Cadre spatio-temporel de l'étude.....	35
4.1 Seuils <i>ED</i> pour la possible occurrence de glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	59
4.2 Seuils <i>ED</i> pour la possible occurrence de glissements de terrain établis en fonction des régions pluviométriques dans la municipalité d'Angra dos Reis...	63
4.3 Résultats de l'analyse par régression logistique pour les différentes échelles d'analyses.....	65
4.4 Classification sommaire des modèles logistiques pour les différentes échelles d'analyses.....	66
4.5 Seuils <i>E<sub>MAPD</sub></i> pour la possible occurrence de glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	72
4.6 Seuils <i>ED</i> pour la possible occurrence de glissements de terrain établis pour divers domaines lithologiques dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	76
4.7 Seuils <i>ED</i> pour la possible occurrence de glissements de terrain établis pour diverses classes d'inclinaison des versants dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	80
4.8 Seuils <i>ED</i> pour la possible occurrence de glissements de terrain établis pour diverses orientations de pente dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	84
4.9 Seuils <i>ED</i> pour la possible occurrence de glissements de terrain établis pour diverses occupations du sol dans la municipalité d'Angra dos Reis.....	89
4.10 Classification sommaire des modèles logistiques pour les différents groupes de paramètres considérés à l'échelle de la municipalité d'Angra dos Reis.....	94



4.11	Résultats de l'analyse par régression logistique pour la paire de variables ( $R$ et $A_{15j}$ ) la plus significative dans le déclenchement de glissements de terrain à l'échelle de la municipalité d'Angra dos Reis.....	95
4.12	Classification sommaire des modèles logistiques pour les différents groupes de paramètres considérés à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis (enregistrements journaliers).....	100
4.13	Résultats de l'analyse par régression logistique pour la paire de variables ( $R$ et $A_{15j}$ ) la plus significative dans le déclenchement de glissements de terrain à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis (enregistrements journaliers).....	101
4.14	Classification sommaire des modèles logistiques pour les différents groupes de paramètres considérés à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis (enregistrements aux 15 minutes).....	106
4.15	Résultats de l'analyse par régression logistique pour la paire de variables ( $R$ et $A_{30j}$ ) la plus significative dans le déclenchement de glissements de terrain à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis (enregistrements aux 15 minutes).....	107
5.1	Seuils pluviométriques pour l'occurrence de glissements de terrain au Brésil...	133
5.2	Seuils pluviométriques $ED$ pour l'occurrence de glissements de terrain à travers le monde.....	135
5.3	Tableau de contingence illustrant les résultats issus d'un modèle de classification binaire.....	144
5.4	Seuils pluviométriques $E_{MAPD}$ pour l'occurrence de glissements de terrain à travers le monde.....	147

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIC	Critère d'information d'Akaike
DAFM	Dépôts alluviaux et fluvio-marins
INEA	Institut Étatique de l'Environnement (Instituto estadual do ambiente)
MAP	Moyenne annuelle pluviométrique
Seuil $E$	Seuil basé sur les précipitations totales des épisodes pluviométriques
Seuil $ED$	Seuil basé sur la durée des épisodes pluviométriques
Seuil $E_{MAPD}$	Seuil basé sur la durée des épisodes pluviométriques normalisé par la moyenne annuelle pluviométrique (MAP)
Seuil $EI$	Seuil basé sur l'intensité des épisodes pluviométriques
Seuil $ID$	Seuil basé sur la durée et l'intensité des épisodes pluviométriques

## LISTE DES SYMBOLES

$A_{(j)}$	Précipitations antécédentes (mm); « j » indique le nombre de jours considéré avant la journée d'occurrence du glissement de terrain
$A_{(3j)}$	Précipitations antécédentes cumulées 3 jours avant la journée d'occurrence du glissement de terrain (mm)
$A_{(5j)}$	Précipitations antécédentes cumulées 5 jours avant la journée d'occurrence du glissement de terrain (mm)
$A_{(10j)}$	Précipitations antécédentes cumulées 10 jours avant la journée d'occurrence du glissement de terrain (mm)
$A_{(15j)}$	Précipitations antécédentes cumulées 15 jours avant la journée d'occurrence du glissement de terrain (mm)
$A_{(30j)}$	Précipitations antécédentes cumulées 30 jours avant la journée d'occurrence du glissement de terrain (mm)
$D$	Durée de l'épisode pluviométrique (h)
$E$	Précipitations cumulées lors de l'épisode pluviométrique (mm)
$Q_{\tau}$	Quantile d'ordre $\tau$ pour $\epsilon \in [0, 1]$
$R$	Précipitations journalières (mm)
$\alpha$	Constante déterminée empiriquement dans l'équation du seuil $ED$ ; valeur de $E$ lorsque $D = 0$
$\beta$	Constante déterminée empiriquement dans l'équation du seuil $ED$ ; taux auquel les précipitations cumulées augmentent en fonction d'une augmentation de la durée des précipitations
$\sigma$	Écart-type

## RÉSUMÉ

Dans l'environnement tropical de la municipalité d'Angra dos Reis, localisée dans l'État de Rio de Janeiro au Brésil, la fréquence des glissements de terrain initiés par les pluies est particulièrement élevée en raison du relief accidenté (Serra do Mar), des fortes précipitations estivales et d'une urbanisation croissante à laquelle est associée une utilisation du sol désordonnée et incontrôlée effectuée sans planification adéquate et adaptée à l'environnement physique et climatique de la région. Dans la mesure où ces glissements interfèrent de manière récurrente avec les activités humaines et les infrastructures, une amélioration des connaissances liées à la prédiction spatiale et temporelle du phénomène revêt un intérêt pour les autorités municipales attirées à la gestion du risque.

La présente étude constitue une analyse par seuil pluviométrique qui a pour but d'établir des corrélations aux échelles locales et régionales entre les précipitations et le déclenchement des glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis, tout en portant une attention particulière à la variabilité spatiale des conditions géologiques, géomorphologiques, climatiques et anthropiques susceptibles d'influer sur les valeurs pluviométriques. Une analyse statistique combinant la régression quantile et la régression logistique binaire a été réalisée sur 1640 et 526 glissements de terrain déclenchés par des précipitations journalières entre janvier 2008 et mars 2013 dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis, de manière à établir des seuils *ED* probabilistes et normalisés ( $E_{MAPD}$ ) et évaluer le rôle des précipitations antécédentes. 98 glissements survenus dans le centre urbain entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 ont également été investigués afin d'évaluer l'impact généré par l'utilisation de mesures pluviométriques à résolution plus fine (aux 15 minutes) sur les valeurs seuils.

La fréquence des glissements dépend fortement de la pluviosité mensuelle et annuelle, alors que leur occurrence est favorisée par la présence de zones urbaines, de pentes orientées au sud ainsi que de secteurs constitués d'orthogneiss et de dépôts alluviaux et fluvio-marins. Les seuils pluviométriques proposés sont particulièrement faibles par comparaison à la majorité des seuils proposés dans la littérature pour le Brésil, les régions tropicales et d'autres endroits à travers le monde. Les paragneiss, les zones urbaines et les précipitations antécédentes cumulées 15 jours avant la journée de déclenchement sont des paramètres qui contribuent à l'abaissement des valeurs seuils. En revanche, les dépôts alluviaux et fluvio-marins, les versants orientés vers le nord, les sols forestiers et les zones de pâturages sont des composantes qui tendent à rehausser les limites pluviométriques, spécialement lors d'événements durant plus de 96 heures. Des études plus approfondies sont toutefois nécessaires afin d'amenuiser les incertitudes associées aux seuils et permettre leur intégration dans un système de surveillance et d'alerte. Davantage de données sont également requises afin de préciser l'effet de la fréquence des mesures pluviométriques sur les valeurs seuils. Les résultats présentés fournissent néanmoins un éclairage nouveau sur la dynamique spatio-temporelle des glissements et les conditions pluviométriques menant à leur déclenchement dans cet environnement tropical et montagneux.

Mots clés : Glissement de terrain – seuil pluviométrique *ED* – précipitations antécédentes – Angra dos Reis – Brésil



## ABSTRACT

In the tropical environment of the municipality of Angra dos Reis, located in the Rio de Janeiro State of Brazil, the frequency of rainfall-induced landslides is particularly high because of the rugged terrain (Serra do Mar), heavy summer rainfall and increasing urbanization which is associated with a disorderly and uncontrolled use of the soil carried out without adequate planning suited to the physical and climatic environment of the region. Since such landslides repeatedly interfere with human activities and infrastructures, improved knowledge related to spatial and temporal prediction of the phenomenon is of interest to municipal authorities managing the risk.

This study is an analysis of rainfall thresholds which aims to establish local and regional scale correlations between rainfall and the triggering of landslides in the municipality of Angra dos Reis, while paying a special attention to the spatial variability of the geological, geomorphological, climatic and anthropogenic conditions that may affect threshold values. A statistical analysis combining quantile regression and binary logistic regression was performed on 1640 and 526 landslides triggered by daily rainfall between January 2008 and March 2013 in the municipality and the urban center of Angra dos Reis, in order to establish probabilistic and normalized *ED* thresholds and assess the role of antecedent rainfall. 98 landslides that occurred in the urban center between May 19 of 2011 and June the 30<sup>th</sup> of 2013 were also investigated to evaluate the effect of sub-hourly rainfall measurements on the threshold limits.

The frequency of landslides depends strongly on the monthly and annual rainfall, while their occurrence is favored by the presence of urban areas, south-facing slopes and areas composed of orthogneiss and fluvial and marine deposits. The proposed thresholds are particularly low compared to most of the thresholds established in the literature for Brazil, the tropics and other places around the world. Paragneiss, urban areas and 15 days antecedent rainfall are parameters that appear to contribute to the lowering of the thresholds. In return, fluvial and marine deposits, slopes facing north, pastures and soils covered by forests are components that tend to increase rainfall limits, especially during events lasting more than 96 hours. However, further studies are necessary to reduce the uncertainties associated with the thresholds and allow their integration into a landslide warning system. More data are also needed to clarify the effect of sub-hourly rainfall measurements on the threshold values. Nevertheless, the results presented in this study provide new insight into the spatial and temporal dynamics of landslides and rainfall conditions leading to their activation in this tropical and mountainous environment.

**Keywords:** Landslide – rainfall *ED* threshold – antecedent rainfall – Angra dos Reis – Brazil

## RESUMO

No ambiente tropical do município de Angra dos Reis, localizado no Estado do Rio de Janeiro no Brasil, a frequência de deslizamentos induzidos por precipitações é particularmente elevada devido ao terreno acidentado (Serra do Mar), chuvas estivais intensas e o crescimento da urbanização, o qual está associado a um uso desordenado e descontrolado do solo realizado sem planejamento adequado e adaptado ao ambiente físico e climático da região. Uma vez que esses deslizamentos interferem repetidamente com as atividades humanas e as infra-estruturas, a melhoria dos conhecimentos relacionados com a previsão espacial e temporal do fenômeno é do interesse para as autoridades municipais responsáveis pela gestão de risco.

Este trabalho é uma análise dos limiares pluviométricos que visa estabelecer correlações na escala local e regional entre chuvas e o desencadeamento de deslizamentos no município de Angra dos Reis, dedicando uma atenção especial à variabilidade espacial das condições geológicas, geomorfológicas, climáticas e antropogênicas que podem afetar os limiares. Uma análise estatística combinando regressão quantílica e regressão logística binária foi realizada com 1640 e 526 deslizamentos causados pela chuva diária entre janeiro de 2008 e março de 2013 no município e no centro urbano de Angra dos Reis, de maneira a estabelecer limites probabilísticos e normalizados ED e avaliar o papel da precipitação antecedente. 98 deslizamentos que ocorreram no centro urbano entre o dia 19 de maio de 2011 e o dia 30 de junho de 2013 também foram investigados para avaliar o efeito das medidas pluviométricas sub-horárias sobre os valores-limite.

A frequência dos deslizamentos depende fortemente das precipitações mensais e anuais, enquanto que a sua ocorrência é favorecida pela presença de áreas urbanas, encostas viradas para o sul e áreas compostas por ortognaisses e depósitos fluvio-marinhos. Os valores críticos propostos são particularmente baixos em comparação com a maioria dos limiares estabelecidos na literatura para o Brasil, os trópicos e outros lugares ao redor do mundo. Os paragneiss, as áreas urbanas e os 15 dias de precipitação antecedentes são parâmetros que parecem contribuir para a redução dos limiares. Em contrapartida, os depósitos fluvio-marinhos, encostas viradas para o norte, pastagens e solos cobertos por florestas são componentes que tendem a aumentar os limites pluviométricos, especialmente durante os eventos que duram mais de 96 horas. No entanto, mais estudos são necessários para reduzir as incertezas associadas aos limiares e permitir a sua integração em um sistema de alerta de deslizamento. Mais dados também são necessários para esclarecer o efeito de medidas pluviométricas sub-horárias nos valores críticos. Apesar disso, os resultados apresentados neste estudo fornecem uma nova visão sobre a dinâmica espacial e temporal dos deslizamentos e condições de chuva que levam a sua ativação neste ambiente tropical e montanhoso.

Palavras chave: Deslizamentos – limiar pluviométrico ED – precipitação antecedente – Angra dos Reis – Brasil

## INTRODUCTION

Les glissements de terrain sont l'un des nombreux processus naturels qui façonnent le relief terrestre. De par leur vitesse, leur capacité à mobiliser une grande quantité de matériel et à se déclencher sans avertissements ou signes précurseurs, ces manifestations d'instabilités des versants représentent donc une menace sérieuse pour les populations et les infrastructures à travers le monde (WP/WLI, 1993; Corominas et Moya, 1999; Cepeda *et al.*, 2010; Staley *et al.*, 2012). Le danger est considérable étant donné que les glissements de terrain peuvent survenir dans tous les environnements de la planète, tant sur terre que dans l'eau, dans les régions humides ou sèches, et sur des pentes abruptes ou très douces (Iverson, 2000; Highland et Bobrowsky, 2008; Hasegawa *et al.*, 2010; Staley *et al.*, 2012). En ce sens, c'est plus de la moitié de la surface terrestre (52 %) qui possède un niveau de susceptibilité aux glissements de terrain considéré comme étant égal ou supérieur à « modéré » (Cepeda *et al.*, 2010). À court terme, le risque encouru par les populations ne devrait pas s'amenuiser en raison d'une hausse observée du nombre de glissements de terrain catastrophiques répertoriés annuellement à travers le globe (Duc, 2013). Une telle intensification serait principalement imputable à une urbanisation croissante, un développement dans des zones susceptibles aux mouvements de sol, une déforestation continue des surfaces sujettes aux glissements de terrain et une augmentation régionale des précipitations causée par un changement des tendances climatiques lié aux activités anthropiques (Van Westen, 2003).

Cette particularité des glissements de terrain à pouvoir survenir n'importe où et à n'importe quel moment est attribuable aux différents facteurs géologiques, géomorphologiques, biophysiques et anthropiques qui influencent leur déclenchement (Wieczorek, 1996; Highland et Bobrowsky, 2008). Les causes préalables d'instabilités des versants, qu'elles soient naturelles (facteurs géologiques et géomorphologiques) ou anthropiques, peuvent s'avérer multiples et agir en synergie. Celles-ci font référence à des facteurs de prédispositions – facteurs statiques et inhérents qui influencent la stabilité des pentes et agissent comme catalyseurs afin de permettre à d'autres facteurs dynamiques de déstabilisation, d'opérer plus efficacement –, comme des matériaux qui perdent leur résistance plus facilement que d'autres en présence



d'eau et qui prédisposent la pente à une rupture durant un orage, ou à des facteurs préparatoires – facteurs dynamiques qui diminuent la stabilité d'une pente sans en initier le mouvement – agissant à court ou long terme, comme la déforestation d'un versant ou un soulèvement tectonique (Glade et Crozier, 2005). Si une multitude de causes peuvent être associées aux glissements de terrain, ceux-ci n'ont toutefois qu'un seul déclencheur, soit un stimulus externe qui engendre une réponse presque immédiate sous la forme de glissement de terrain en augmentant rapidement les contraintes ou en diminuant la résistance des matériaux (Wieczorek, 1996; SafeLand, 2012). En général, les principaux mécanismes de déclenchement identifiés sont les précipitations, une fonte rapide du couvert nival, un changement des niveaux d'eau (marin, riverain, nappe phréatique, etc.), les éruptions volcaniques et les secousses sismiques (Keefer *et al.*, 1987; Wieczorek, 1996; Highland et Bobrowsky, 2008; SafeLand, 2012).

Au Brésil comme ailleurs, le mécanisme de saturation des pentes par l'eau de pluie représente la cause principale du déclenchement des glissements de terrain (Polemio et Petrucci, 2000; Zêzere et Rodrigues, 2002; Fernandes *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2005; Highland et Bobrowsky, 2008; Parizzi *et al.*, 2010; Berti *et al.*, 2012; Ribeiro *et al.*, 2013). Leur déclenchement est lié à des événements pluviométriques exceptionnels d'une courte durée, comme des précipitations intenses associées à un orage, ou à des événements d'une longue durée et d'une faible intensité (Ritter *et al.*, 2006; SafeLand, 2012). Plus précisément, les précipitations de forte intensité et courte durée sont reconnues pour déclencher des glissements de terrain superficiels (Campbell, 1975; Wieczorek, 1987; Crosta, 1998; Corominas et Moya, 1999; Polemio et Petrucci, 2000; Zêzere et Rodrigues, 2002; Martelloni *et al.*, 2012) – glissements dont la profondeur de la surface de rupture est inférieure à deux mètres (Caine, 1980; Terlien, 1998) –, alors que les précipitations de longue durée et de faible intensité provoquent généralement des glissements de terrain profonds – glissements dont la profondeur de la surface de rupture est supérieure à deux mètres – (Larsen et Simon, 1993; Aleotti, 2004; Dahal et Hasegawa, 2008; Martelloni *et al.*, 2012). Cependant, la relation de cause à effet entre les pluies et les glissements de terrain n'est pas si simple (Aleotti, 2004). Leur déclenchement est plutôt associé à l'infiltration de l'eau dans le sol qui cause une augmentation de la pression hydraulique et une diminution de la résistance du sol, menant ultimement à une rupture de la surface affectée (Selby, 1993;

Terlien, 1998; Talebi *et al.*, 2010). L'efficacité du processus dépend donc des propriétés hydrauliques, physiques et mécaniques du terrain, en plus d'autres facteurs comme l'inclinaison de la pente, la couverture végétale et les caractéristiques climatiques (Aleotti, 2004). À ce chapitre, les régions montagneuses sont particulièrement susceptibles à une saturation des sols par l'eau de pluie et à l'occurrence subséquente de glissements de terrain en raison du soulèvement orographique des masses d'air humides qui provoque des précipitations plus importantes en altitude et sur les versants exposés aux vents dominants (Nunes et Modesto, 1992; Wilson, 2000; Jakob et Weatherly, 2003; Nadim *et al.*, 2009; Vieira *et al.*, 2010).

Dans la municipalité brésilienne d'Angra dos Reis, située dans la cordillère de la *Serra do Mar*, les fortes précipitations estivales ont historiquement déclenché plusieurs glissements de terrain, occasionnant un nombre important de victimes et des dommages considérables et ce, particulièrement depuis les dix dernières années. À titre d'exemple, les événements catastrophiques de décembre 2002 et du 1<sup>er</sup> janvier 2010 ont fait 93 victimes, forcé l'évacuation de plus de 2500 résidences et engendré des pertes économiques d'environ 120 millions \$ R, soit 58 millions \$ CAD (Vale do Aço, 2010; Infoglobo, 2013). Dans cet environnement tropical, la fréquence des glissements de terrain initiés par les pluies est particulièrement élevée en raison du relief accidenté, des fortes précipitations estivales et d'une utilisation du sol désordonnée et incontrôlée, effectuée sans planification adéquate et adaptée à l'environnement physique et climatique de la région (Ribeiro *et al.*, 2013). Le risque que pose cet aléa géomorphologique est particulièrement élevé du fait que près de 60 % de la population vit en contexte de versants (Bortoloti, 2010) et plus de 25 % (44 000 habitants) habitent des zones jugées à « haut risque » de glissements de terrain (Service Géologique du Brésil [CPRM], 2014). Ainsi, en fonction de la localisation de la rupture, ce phénomène géomorphologique peut représenter un risque pour la sécurité publique et les infrastructures. En effet, de telles ruptures, parfois rapides et soudaines, peuvent entrer en conflit avec les activités humaines et endommager ou détruire les infrastructures statiques (bâtiments, ponts, conduits, routes, etc.); d'où l'importance d'étudier les relations entre les caractéristiques pluviométriques et l'occurrence de glissements de terrain de façon à améliorer la prédiction spatiale et temporelle du phénomène et en minimiser les répercussions.

Le danger que représentent les glissements de terrain pour la société ainsi que l'importance reconnue des précipitations dans leur déclenchement a mené plusieurs scientifiques à analyser la quantité de pluie nécessaire à leur occurrence depuis plus d'une quarantaine d'années. Plus précisément, les chercheurs ont orienté leurs recherches vers l'établissement de seuils pluviométriques, soit « des valeurs qui, lorsqu'atteintes ou excédées, sont susceptibles de déclencher des glissements de terrain » (Reichenbach *et al.*, 1998; Mathew *et al.*, 2013). Malgré les nombreuses études réalisées à ce jour, la quantité de pluie requise pour amorcer des mouvements de terrain demeure difficile à déterminer avec précision (SafeLand, 2012). En effet, les caractéristiques pluviométriques responsables du déclenchement des glissements de terrain peuvent varier considérablement dans l'espace en fonction, entre autres, des propriétés des matériaux et des conditions de pente (Terlien, 1998). En ce sens, les seuils existants sont représentatifs des conditions géologiques, géomorphologiques, climatiques et anthropiques propres à chaque région ou localité et sont par conséquent difficilement exportables. Il n'existe donc pas de valeurs pluviométriques généralisables à l'ensemble des sols de la planète.

Depuis une dizaine d'années, l'intérêt des autorités municipales d'Angra dos Reis pour des études portant sur les glissements de terrain déclenchés par les pluies s'est grandement accru en raison de la fréquence élevée du phénomène, des dommages occasionnés et de la vulnérabilité fonctionnelle et économique de la région où l'on retrouve trois centrales nucléaires, des réseaux majeurs de transport terrestre ainsi qu'une forte affluence touristique. Dans ce contexte, les autorités municipales d'Angra dos Reis s'intéressent depuis peu à l'établissement de seuils pluviométriques, lesquels permettraient d'anticiper l'occurrence spatiale et temporelle du phénomène. De tels seuils pourraient ultimement être intégrés à un système de surveillance et d'alerte des glissements de terrain et servir de composante nécessaire à l'évaluation de l'aléa. Toutefois, depuis l'amorce des recherches portant sur les glissements de terrain déclenchés par les pluies au Brésil, aucun seuil convenable n'a été proposé pour le territoire d'Angra dos Reis. En effet, les seuils de Guidicini et Iwasa (1977) et Tatizana *et al.* (1987) ont été établis pour l'ensemble de la *Serra do Mar* dont la superficie est quatre fois plus grande que celle d'Angra dos Reis, tandis que celui élaboré par Soares (2006) n'est pas représentatif des conditions de déclenchement en raison de l'emploi d'une base inadéquate de données. Ainsi, malgré la récurrence de cet aléa naturel et les risques socioéconomiques qu'il



pose, les relations entre les caractéristiques pluviométriques et l'occurrence des glissements de terrain demeurent peu étudiées et en partie incomprises dans cette région accidentée du Sud-est brésilien. Par conséquent, l'établissement de seuils pluviométriques à l'échelle locale et régionale revêt un grand intérêt pour la municipalité d'Angra dos Reis. En effet, l'établissement de seuils adaptés aux caractéristiques du territoire et issus de données récentes et fiables pourrait s'avérer un outil efficace de gestion du risque (prévention et mitigation) de glissements de terrain.

Dans ce contexte et considérant l'importance d'améliorer les connaissances liées à la prédiction spatiale et temporelle des glissements de terrain dans cet environnement montagneux, l'étude proposée dans le cadre de ce mémoire constitue une analyse par seuil pluviométrique qui a pour objectif principal d'établir des corrélations aux échelles locale et régionale entre les précipitations et le déclenchement des glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis, localisée dans l'État de Rio de Janeiro au Brésil. L'approche par seuil pluviométrique empirique adoptée allie des techniques provenant de la climatologie – l'étude scientifique des climats (Rohli et Vega, 2008) – et des techniques issues de la géomorphologie – l'étude des formes du relief et des processus qui les créent (Hugget, 2011). Ce travail a pour but de déterminer la ou les caractéristique(s) pluviométrique(s) responsables du déclenchement des glissements de terrain, tout en portant une attention particulière à la variabilité spatiale des conditions géologiques, géomorphologiques, climatiques et anthropiques susceptibles d'influer sur les valeurs pluviométriques.

Pour ce faire, quatre objectifs secondaires sont poursuivis : 1) décrire la dynamique spatio-temporelle des glissements de terrain; 2) établir des seuils probabilistes locaux et régionaux basés sur la durée des épisodes pluviométriques (seuils  $ED$  et  $E_{MAPD}$ ); 3) établir des seuils  $ED$  en fonction de la variabilité des caractéristiques géographiques (lithologie, pente, orientation et occupation du sol); et 4) évaluer le rôle des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain. Ces glissements, dans la mesure où ils interfèrent avec les activités humaines et endommagent les infrastructures, sont considérés comme un aléa naturel dont l'occurrence est principalement liée aux caractéristiques pluviométriques.

En l'absence de seuils pluviométriques fiables et représentatifs de l'activité géomorphologique sur le territoire d'Angra dos Reis, les résultats obtenus devraient permettre d'établir une

relation quantitative aux échelles locale et régionale entre l'occurrence des glissements de terrain (ou non-occurrence) et la pluviométrie, fournissant du même coup un outil de gestion pertinent aux autorités municipales. Les résultats pourront ensuite être comparés à des seuils pluviométriques similaires établis au Brésil et ailleurs dans le monde, être intégrés à un système de surveillance et d'alerte et servir de composante de base à l'évaluation de l'aléa sur le territoire d'Angra dos Reis et ce, dans le but ultime d'anticiper avec précision l'occurrence spatiale et temporelle des glissements de terrain et conséquemment d'orienter les développements futurs vers des zones sécuritaires tout en facilitant la mise en place de mesures de mitigation adéquates. Enfin, les conclusions présentées devraient apporter un éclairage nouveau sur le rôle des précipitations en tant que facteur de déclenchement des glissements de terrain dans cet environnement montagneux du Brésil.



## CHAPITRE I

### REVUE DE LITTÉRATURE

Dans le contexte observé d'une intensification des aléas naturels associée à une démographie et une urbanisation croissante, particulièrement dans les pays émergents, la prévision des risques à des fins d'aménagement sécuritaire du territoire prend toute son importance. Par conséquent, une meilleure connaissance de la dynamique spatio-temporelle de ces phénomènes, spécialement des glissements de terrain, est impérative. Ce chapitre a donc pour objectif de faire l'état des connaissances scientifiques en lien avec l'établissement de seuils pluviométriques associés à la possible occurrence de glissements de terrain. La première section définit les termes principaux associés à la notion de seuil pluviométrique. La seconde s'intéresse à la typologie des approches utilisées dans la littérature scientifique pour établir des seuils pluviométriques et présente de manière plus détaillée les fondements de l'approche empirique. Enfin, la troisième section fait un compte rendu des principales conclusions dégagées par les études ayant traitées des conditions pluviométriques seuils dans une perspective de prévision des glissements de terrain.

#### 1.1 La notion de seuil pluviométrique

Le terme *seuil pluviométrique* est défini comme la valeur pluviométrique qui, lorsqu'atteinte ou excédée, est susceptible de déclencher des glissements de terrain (Reichenbach *et al.*, 1998; Mathew *et al.*, 2013). Un seuil minimum signifie la plus faible valeur pluviométrique au-dessous de laquelle des glissements de terrain ne sont pas déclenchés (Reichenbach *et al.*, 1998; Crozier, 1999; Guzzetti *et al.*, 2007), alors qu'un seuil maximum représente la valeur pluviométrique au-dessus de laquelle des mouvements de sols sont toujours déclenchés (Reichenbach *et al.*, 1998; Guzzetti *et al.*, 2007).

## 1.2 Typologie des approches

L'occurrence de tempêtes comme facteur de déstabilisation des pentes raides a amené plusieurs scientifiques, dès les années 1970, à analyser la relation entre les caractéristiques pluviométriques et le déclenchement des glissements de terrain (Talebi *et al.*, 2010). Plusieurs chercheurs ont ainsi orienté leurs études vers l'établissement de seuils pluviométriques pour l'occurrence possible de glissements de terrain.

À ce jour, deux approches ont été proposées et largement utilisées dans la littérature scientifique de manière à évaluer la relation entre les glissements de terrain et les précipitations. La première approche repose sur des modèles physiques (processuels) (Montgomery et Dietrich, 1994; Wilson et Wieczorek, 1995; Wu et Sidle, 1995; Terlien, 1998; Iverson, 2000; Montgomery *et al.*, 2000; Crosta et Frattini, 2003; Baum *et al.*, 2010; Raia *et al.*, 2013) ayant pour objectif d'étendre spatialement les modèles de stabilité de pente largement employés en ingénierie géotechnique (Kanungo et Sharma, 2014). La seconde approche est basée sur l'établissement de seuils empiriques (Caine, 1980; Reichenbach *et al.*, 1998; Guzzetti *et al.*, 2008), lesquels reposent sur l'analyse statistique des événements pluviométriques ayant causé des glissements de terrain (Kanungo et Sharma, 2014). Ces deux approches témoignent de la nature interdisciplinaire des études portant sur les glissements de terrain déclenchés par les pluies, avec des contributions provenant de différents champs d'expertise tels que l'ingénierie, la géologie, l'hydrologie et la géomorphologie (Crosta et Frattini, 2008; Brunetti *et al.*, 2010; Staley *et al.*, 2012).

Dans le cadre de cette recherche, c'est l'approche empirique qui sera utilisée dans la mesure où l'approche physique requiert une collecte exhaustive de données portant sur les caractéristiques du sol (hydrologie, lithologie et morphologie) susceptibles d'influencer et de contrôler le déclenchement des glissements de terrain (Guzzetti *et al.*, 2007). Ces informations ne sont d'ailleurs pas disponibles à l'échelle de la municipalité d'Angra dos Reis compte tenu de l'étendue du territoire à l'étude.

### 1.2.1 Approche empirique

Les seuils pluviométriques empiriques sont obtenus en traçant la limite inférieure (seuil minimum) des conditions pluviométriques ayant généré des glissements de terrain sur un graphique à coordonnées cartésiennes, semi-logarithmiques ou logarithmiques (Mathew *et al.*, 2013). Ils sont généralement tracés visuellement, soit sans critères mathématiques ou statistiques (Guzzetti *et al.*, 2007). Lorsque des informations sur les conditions pluviométriques n'ayant pas initié de glissements de terrain sont également disponibles, le seuil est alors établi comme le meilleur séparateur visuel des conditions de déclenchement *versus* non-déclenchement (Berti *et al.*, 2012). Toutefois, des auteurs ont récemment critiqué et remis en question cette méthode en raison de son manque d'objectivité et de reproductibilité (Guzzetti *et al.*, 2008). Ainsi, pour éviter que des chercheurs travaillant avec la même base de données obtiennent des résultats différents selon la méthode employée, d'autres chercheurs ont proposé de nouvelles techniques probabilistes plus objectives afin d'établir des seuils pluviométriques : l'inférence bayésienne (Guzzetti *et al.*, 2007; 2008; Brunetti *et al.*, 2010; Berti *et al.*, 2012), l'approche fréquentielle (Brunetti *et al.*, 2010; Peruccacci *et al.*, 2012; Brunetti *et al.*, 2013; Vennari *et al.*, 2014) et la régression logistique (Frattoni *et al.*, 2009; Mathew *et al.*, 2013).

Indépendamment de la méthode employée, plusieurs types de seuils pluviométriques empiriques pour l'occurrence possible de glissements de terrain ont été proposés dans la littérature. Ces seuils sont basés sur l'étendue géographique à l'étude et le type de mesure pluviométrique utilisé pour établir ces derniers (Guzzetti *et al.*, 2008; Talebi *et al.*, 2010).

Lorsque définis en fonction de l'étendue géographique auxquels ils sont associés, les seuils empiriques peuvent être de types globaux, régionaux ou locaux. Les seuils globaux font référence au niveau universel sous lequel les glissements de terrain ne sont pas déclenchés, indépendamment des caractéristiques géologiques, géomorphologiques et d'utilisation du sol présentes localement ainsi que des tendances pluviométriques régionales et historiques (Guzzetti *et al.*, 2007; Kanungo et Sharma, 2014). Des seuils globaux ont été proposés par Caine (1980), Innes (1983), Jibson (1989), Clarizia *et al.* (1996), Crosta et Frattini (2001), Cannon et Gartner (2005) et Guzzetti *et al.* (2008). Les seuils régionaux sont définis pour des zones géographiques s'étendant sur plusieurs centaines à des milliers kilomètres carrés et



possédant des caractéristiques géologiques, climatiques et physiographiques similaires (Guzzetti *et al.*, 2007). À ce jour, plusieurs seuils pluviométriques régionaux ont été proposés dans la littérature scientifique (Onodera *et al.*, 1974; Campbell, 1975; Nilsen et Turner, 1975; Guidicini et Iwasa, 1977; Moser et Hohensinn, 1983; Tatizana *et al.*, 1987; Larsen et Simon, 1993; Sandersen *et al.*, 1996; Au, 1998; Corominas et Moya, 1999; Chleborad, 2003; Jakob et Weatherly, 2003; Kanji *et al.*, 2003; Aleotti, 2004; Gabet *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2005; Jan et Chen, 2005; Godt *et al.*, 2006; Cannon *et al.*, 2008; Dahal et Hasegawa, 2008; Marques *et al.*, 2008; Akcali *et al.*, 2010; Brunetti *et al.*, 2010; Saito *et al.*, 2010; Rosi *et al.*, 2012; Brunetti *et al.*, 2013; Mathew *et al.*, 2013; Vennari *et al.*, 2014; et Gariano *et al.*, 2015). Enfin, les seuils locaux considèrent le régime climatique et l'environnement géomorphologique à l'échelle locale, et sont applicables à des glissements singuliers ou à un groupe de glissements dans des zones géographiques restreintes à quelques centaines de kilomètres carrés (Guzzetti *et al.*, 2007). Des seuils locaux ont été développés par Endo (1970), Cannon et Ellen (1985), Wieczorek (1987), Cannon (1988), Wilson *et al.* (1992), Tuñgol et Regalado (1996), Annunziati *et al.* (2000), Bell et Maud (2000), Ortigão *et al.* (2001), Rahardjo *et al.* (2001), Marchi *et al.* (2002), Zêzere et Rodrigues (2002), Floris *et al.* (2004), Giannecchini (2006), Rahardjo *et al.* (2008), Tiranti et Rabuffetti (2010), Giannecchini *et al.* (2012), Kanungo et Sharma (2014) et Verrani *et al.* (2014).

Lorsque fondés sur le type de mesure pluviométrique employé, les seuils pluviométriques sont généralement répartis en trois catégories : i) les seuils qui combinent des mesures pluviométriques obtenues pour un épisode pluviométrique spécifique; ii) les seuils qui incluent les conditions antécédentes; et iii) les autres seuils, dont les seuils hydrologiques (Kanungo et Sharma, 2014). Les seuils obtenus en utilisant des mesures provenant d'événements pluviométriques peuvent être subdivisés davantage et ce, même s'il n'existe pas un ensemble de mesures uniques permettant de caractériser les conditions pluviométriques susceptibles (ou non) de déclencher des glissements de terrain : 1) les seuils de durée-intensité (ID); 2) les seuils basés sur les précipitations totales de l'épisode pluviométrique (E); 3) les seuils d'intensité de l'événement pluviométrique (EI); et 4) les seuils de durée de l'épisode pluviométrique (ED) (Guzzetti *et al.*, 2008).

### 1.2.1.1 Contexte historique

L'établissement du premier seuil pluviométrique combinant des mesures propres à un évènement pluviométrique est préalablement fondé sur la reconnaissance par Campbell (1975) de l'importance des précipitations de forte intensité dans le déclenchement de glissements de terrain superficiels. Celui-ci a postulé qu'après une précipitation antécédente suffisante, l'infiltration intense des précipitations orageuses créait des aquifères perchés temporairement avec des pressions hydrauliques positives qui permettaient de réduire la résistance au cisaillement des sols et ainsi initier des glissements de terrain superficiels. Par la suite, Starkel (1979) a élaboré le concept de seuil pluviométrique critique à partir d'une combinaison de mesures pluviométriques variables en termes d'intensité et de durée. Caine (1980) a ensuite développé le tout premier seuil *ID* en utilisant des données provenant de 73 évènements pluviométriques ayant déclenchés des glissements de terrain à travers le monde. Depuis, de nombreux chercheurs ont employé l'approche par seuil pluviométrique en utilisant diverses combinaisons de paramètres pluviométriques (Mathew *et al.*, 2013).

### 1.2.1.2 Seuils de durée de l'épisode pluviométrique (*ED*)

Les seuils *ED* sont communs dans la littérature scientifique (Guzzetti *et al.*, 2007). En règle générale, ils sont représentés par une équation linéaire sous la forme suivante :

$$E = \alpha + \beta * D \quad (1)$$

où *E* représente les précipitations cumulées lors de l'évènement pluviométrique (mm), *D* est la durée des précipitations (heures), et  $\alpha$  (interception avec l'axe des ordonnées; valeur de *E* lorsque  $D = 0$ ) et  $\beta$  (inclinaison; taux auquel les précipitations cumulées augmentent en fonction d'une augmentation de la durée des précipitations) sont des paramètres dérivés empiriquement. Les seuils *ED* peuvent aussi être représentés par une loi de puissance, largement utilisée avec les seuils *ID*, laquelle prend la forme suivante :

$$E = \alpha D^\beta \quad (2)$$

En général, l'utilisation d'une loi de puissance pour prédire l'occurrence des glissements de terrain est basée sur deux présomptions : 1) il y a un accroissement non linéaire dans la probabilité de déclenchement des glissements de terrain, lequel est fonction d'une amplification des précipitations cumulées lors d'un événement pluviométrique; et 2) un accroissement de la durée des précipitations engendre une augmentation des précipitations totales requises pour déclencher les glissements de terrain (Staley *et al.*, 2012). Dans les deux cas, un épisode pluviométrique est susceptible de déclencher un ou plusieurs glissements de terrain si les précipitations totales ( $E$ ) sont telles que  $E \geq \alpha + \beta * D$  (Cepeda *et al.*, 2010). À ce jour, quelques auteurs ont proposés ce type de seuil (Caine, 1980; Innes, 1983; Wilson *et al.*, 1992; Sandersen *et al.*, 1996; Corominas et Moya, 1999; Annunziati *et al.*, 2000; Zêzere et Rodrigues, 2002; Kanji *et al.*, 2003; Aleotti, 2004; Giannecchini, 2006; Giannecchini *et al.*, 2012 et Peruccacci *et al.*, 2012; Brunetti *et al.*, 2013; Vennari *et al.*, 2014; et Gariano *et al.*, 2015).

Un des inconvénients des seuils  $ED$  consiste au fait qu'ils sont définis pour des zones et des régions spécifiques et, par conséquent, sont difficilement exportables à des régions avoisinantes et des zones similaires (Crosta, 1990). Une façon commune de les rendre comparables consiste à normaliser les totaux pluviométriques en utilisant des mesures empiriques du climat local (Aleotti, 2004; Guzzetti *et al.*, 2007), tel qu'initialement présenté par Guidicini et Iwasa (1977). Généralement, la normalisation des seuils s'effectue en divisant les précipitations cumulées lors de l'évènement pluviométrique ( $E$ ) par la moyenne annuelle des précipitations ( $MAP$ ) (Wieczorek, 1987; Jibson, 1989; Aleotti, 2004; Guzzetti *et al.*, 2007).

#### 1.2.1.3 Précipitations antécédentes

Les précipitations antécédentes sont définies comme la quantité de pluie cumulée durant un nombre spécifique de jours précédant l'occurrence du ou des glissements de terrain (Terlien, 1998; Guzzetti *et al.*, 2007). Elle:s ont été abondamment utilisées dans les études visant à établir des seuils pluviométriques et évaluer l'influence des conditions antécédentes dans le déclenchement de mouvements de masse (Brand *et al.*, 1984; Kim *et al.*, 1991; Pasuto et Silvano, 1998; Terlien, 1998; Corominas et Moya, 1999; Crozier, 1999; Glade *et al.*, 2000;



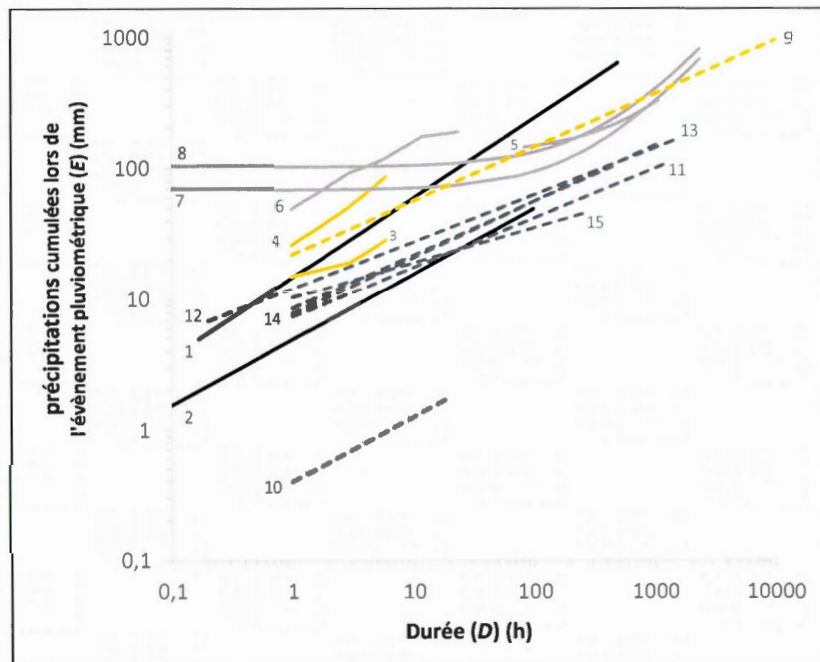
Wieczorek *et al.*, (2000; Chleborad, 2003; Heyerdahl *et al.*, 2003; Aleotti, 2004; Gabet *et al.*, 2004 et Cardinali *et al.*, 2006). La prise en compte de cette variable repose sur l'assumption que le niveau de la nappe phréatique et les conditions d'humidité du sol sont des facteurs qui prédisposent les versants à des ruptures (Guzzetti *et al.*, 2007). En retour, ces facteurs sont directement influencés par les précipitations antécédentes qui contribuent à la saturation du sol (Keefer *et al.*, 1987).

### 1.3 Principaux constats

#### 1.3.1 Valeurs seuils

De nombreuses études abordant les glissements de terrain avec une approche par seuil pluviométrique empirique ont été réalisées depuis les années 1970. Au moins 321 seuils provenant de 94 études ont été recensés, dont 18 seuils globaux, 193 seuils régionaux et 110 seuils locaux. Les plus communs sont les seuils *ID* avec 150 cas, dont 39 ont été normalisés. Suivent dans l'ordre les seuils *E* avec 74 cas (20 normalisés), les seuils *ED* avec 65 cas (10 normalisés) et les seuils *EI* avec 36 cas (19 normalisés). Lorsque comparés graphiquement, des différences considérables peuvent être observées entre les principaux seuils proposés dans la littérature scientifique.

Pour les seuils *ED* (fig. 1.1), les courbes seuils montrent des tendances ascendantes et des gradients semblables. Toutefois, les valeurs critiques varient de manière significative en ce qui concerne la quantité minimale de précipitations requises pour l'occurrence de mouvements de masse. Ainsi, des ruptures de pente sont attendues pour des précipitations cumulant entre 17,2 et 179,4 mm en 12 heures, entre 24,4 et 195 mm en 24 heures, entre 35,6 et 239,9 mm en 96 heures, entre 46,3 et 434,3 mm en 254 heures et entre 105,1 et 432,4 mm pour des précipitations d'au moins 1000 heures. À cet égard, seul le seuil établi par Cannon *et al.* (2011) dans un environnement récemment incendié s'avère hors normes avec l'occurrence de coulées de débris correspondant à des précipitations de 0,4 mm en une heure et 2 mm en 24 heures. En ce qui concerne la durée couvertes par les seuils, elle s'étend de 6 minutes à 10 000 heures.



**Figure 1.1** Principaux seuils de durée de l'épisode pluviométrique (ED) établis dans le Monde. *Légende* : Ligne noire, seuils globaux; Tirets, seuils régionaux; Ligne grise, seuils locaux; Jaune, climat tropical (Af, Aw ou Am); *Sources* : 1, Caine (1980); 2, Innes (1983); 3-4, Wilson *et al.* (1992); 5, Corominas et Moya (1999); 6, Annunziati *et al.* (2000); 7-8, Zêzere et Rodrigues (2002); 9, Kanji *et al.* (2003); 10, Cannon *et al.* (2011); 11-12, Peruccacci *et al.* (2012); 13, Brunetti *et al.* (2013); 14, Vennari *et al.* (2014); 15, Garianio *et al.* (2015).

Les disparités entre les seuils sont essentiellement liées à des paramètres d'ordre méthodologique (traditionnelle ou probabiliste), à l'échelle d'analyse, au type de mouvement de masse considéré, aux conditions climatiques, géologiques, géomorphologiques et à l'utilisation du sol associée à la zone d'étude ainsi que la qualité, la représentativité et la taille de la base de données utilisée. À titre d'exemple, l'échelle d'analyse peut considérablement affecter les valeurs pluviométriques seuils. Les seuils globaux tendent à se positionner dans la partie inférieure du graphique par comparaison à une position plus élevée pour les seuils locaux et régionaux. Selon Guzzetti *et al.* (2007), ces différences sont principalement attribuables à un artefact introduit par les différentes échelles géographiques qui affectent la résolution de l'échantillon pluviométrique. En effet, les mesures pluviométriques tendent à augmenter au fur et à mesure que la résolution d'échantillonnage s'accroît, résultant en des conditions de déclenchement *ED* plus sévères, mais plus réalistes.



### 1.3.2 Influence des précipitations antécédentes

Même si les précipitations antécédentes ont été abondamment étudiées pour l'établissement de seuils pluviométriques, leur influence (possible) dans le déclenchement de glissements de terrain demeure complexe à déterminer. D'abord, leur influence peut varier considérablement sur un même territoire en fonction de variations locales ou régionales des conditions climatiques, géologiques, géomorphologiques et anthropiques (Kim *et al.*, 1991). Ensuite, il n'y a toujours pas de consensus scientifique par rapport au nombre de jours devant être considéré pour que le seuil représente adéquatement le rôle des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain (Rahardjo *et al.*, 2001; Wieczorek et Glade, 2005; Frattini *et al.*, 2009). Au sein de la littérature, des corrélations ont été établies pour des périodes antécédentes très variées, allant de 1 à 120 jours (Govi et Sorzana, 1980; Kim *et al.*, 1991; Pasuto et Silvano, 1998; Terlien, 1998; Crozier, 1999; Glade *et al.*, 2000; Wieczorek *et al.*, 2000; Chleborad, 2003; Heyerdahl *et al.*, 2003; Aleotti, 2004; Cardinali *et al.*, 2006). Enfin, même si plusieurs chercheurs ont démontré l'importance des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain, d'autres ont tout de même remis en question le rôle de ces précipitations. C'est le cas de Brand *et al.* (1984) qui stipulent qu'elles sont négligeables dans les régions tropicales en raison des fortes intensités pluviométriques qui suffisent, à elles seules, pour initier des mouvements de masse. Pour Corominas et Moya (1999) et Aleotti (2004), les précipitations antécédentes apparaissent marginales dans les sols bien drainés, soit les sols grossiers et fortement perméables.

### 1.3.3 Normalisation des seuils

La normalisation représente une avancée importante dans les études par seuils pluviométriques et fait suite au constat de plusieurs chercheurs, à savoir que chaque région serait en équilibre dynamique avec les conditions pluviométriques (Guidicini et Iwasa, 1977; Govi et Sorzana, 1980; Cannon, 1988; Bacchini et Zannoni, 2003; Aleotti, 2004; Giannellini, 2006). Il est ainsi assumé que les régions présentant une forte pluviométrie annuelle nécessitent davantage de pluie afin de générer des glissements de terrain en raison d'une conductivité hydraulique élevée des sols par comparaison aux régions ayant une faible pluviosité annuelle (Guidicini et Iwasa, 1977; Innes, 1983). Toutefois, des différences significatives demeurent présentes entre les

seuils locaux et régionaux normalisés et définis pour des zones voisines ou similaires. Ceci est probablement le résultat d'un manque d'homogénéité dans les séries de données et une variabilité géographique des conditions pluviométriques susceptibles de déclencher des glissements de terrain (Guzzetti *et al.*, 2007).

#### 1.3.4 Aspects méthodologiques

En ce qui concerne les techniques employées et recensées dans la littérature scientifique, l'utilisation d'une approche probabiliste (bayésienne, fréquentielle, régression logistique) est fortement souhaitable. En effet, de telles méthodes favorisent l'établissement de seuils objectifs et représentatifs des conditions pluviométriques ayant causé des mouvements de masse. À cet égard, Brunetti *et al.* (2010) soulignent que la méthode bayésienne est plus appropriée lorsqu'employée sur de petits jeux de données tandis que la méthode fréquentielle est plus adaptée aux grandes séries de données. Somme toute, les méthodes probabilistes sont plus précises et tendent à rehausser les valeurs pluviométriques par rapport aux méthodes traditionnelles. De plus, elles ont l'avantage de favoriser une intégration simple des seuils pluviométriques dans des systèmes de surveillance et d'alertes du fait qu'elles permettent la définition de plusieurs seuils en fonction de différents niveaux de dépassement.

#### 1.3.5 Influence des facteurs géographiques

En termes de propriétés géologiques, il semble que la perméabilité et l'épaisseur des sols soient les paramètres qui influencent le plus les valeurs pluviométriques responsables du déclenchement des glissements de terrain. D'abord, un sol très perméable et bien drainé requiert généralement des pluies très intenses pour se saturer ou initier du ruissellement. En contrepartie, un sol peu perméable nécessite soit des précipitations très intenses et courtes pour favoriser le ruissellement et le déclenchement de coulées de débris, soit des précipitations faibles à modérées sur une longue période afin de permettre l'infiltration graduelle de l'eau dans le sol et mener à des ruptures superficielles ou profondes. C'est notamment le cas des sols volcaniques qui requièrent des valeurs pluviométriques très élevées sur une courte période pour initier des coulées compte tenu de la forte perméabilité des sols, laquelle facilite l'infiltration

de l'eau en profondeur et diminue la probabilité de ruissellement (Tuñgol et Regalado, 1996). Seules des précipitations très intenses semblent pouvoir surpasser les taux d'infiltration de ces sols et générer un écoulement de surface qui incorporera des sédiments pour éventuellement générer des lahars. Ensuite, l'épaisseur des sols peut également affecter les valeurs pluviométriques responsables des mouvements de sols. En effet, le décrochement d'un sol profond est lié à une percolation lente de l'eau de pluie et/ou une augmentation constante de la nappe phréatique résultant de précipitations antécédentes et actuelles sur une longue durée, quoique d'une faible intensité (Larsen et Simon, 1993; Guzzetti *et al.*, 2007; Marques *et al.*, 2008). À l'inverse, la rupture d'un sol superficiel (<2 m) est facilitée par des événements pluviométriques exceptionnels d'une courte durée et d'une forte intensité (Campbell, 1975; Wieczorek, 1987; Martelloni *et al.*, 2012) et n'est généralement pas affectée par les précipitations antécédentes (Cannon et Ellen, 1985; Crosta et Frattini, 2001). Par contre, les feux de forêts tendent à réduire le volume, l'intensité et la durée des précipitations requises au déclenchement de coulées de débris en créant une couche de sol hydrophobe qui modifie les conditions d'infiltration et d'écoulement des sols (Cannon et Gartner, 2005; Cannon *et al.*, 2008, 2011).

Quoique peu analysée dans la littérature en termes de valeurs seuils, il semble que l'angle de pente soit l'un des paramètres topographiques qui influence le plus les valeurs pluviométriques seuils associées au déclenchement des glissements de terrain. Selon Akcali *et al.* (2010), des précipitations plus intenses sont nécessaires pour initier des ruptures sur des pentes très abruptes (>60°) ou très douces (<30°) par comparaison à des sols dont les angles se situent entre 30 et 60 degrés. Cette tendance serait intimement liée à l'épaisseur des sols ainsi qu'aux différents mécanismes d'infiltration affectant les pentes en fonction de leur inclinaison. À cet égard, une faible inclinaison de pente (<30°) tend à réduire la contrainte de cisaillement et favorise le développement des sols, faisant ainsi augmenter le volume d'eau nécessaire à leur saturation et décrochement subséquent. De manière similaire, les sols fortement inclinés (>60°) nécessitent aussi de très fortes intensités pluviométriques pour déclencher des glissements de terrain même si la forte inclinaison augmente la contrainte exercée par la gravité. En effet, une pente fortement inclinée tend à augmenter le ruissellement de surface, diminuant ainsi la quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol et la probabilité de saturation de ceux-ci et ce, même si l'épaisseur à saturer est généralement minimale (sols superficiels).



L'orientation des pentes représente un autre paramètre topographique qui influence la quantité de pluie enregistrée localement et, par conséquent, les valeurs seuils associées. En milieu montagneux par exemple, les pentes qui font face aux vents dominants sont reconnues pour recevoir davantage de pluie en raison du soulèvement orographique des masses d'air humides qui provoque des précipitations plus importantes sur ces versants (Wilson, 2000; Jakob et Weatherly, 2003; Vieira *et al.*, 2010). En suivant la logique appliquée à la normalisation des seuils par la MAP (les zones à forte pluviosité requièrent davantage de pluie pour déclencher des glissements de terrain comparativement aux zones à faible pluviosité), les versants faisant face aux vents dominants, dont la pluviosité annuelle est plus élevée, devraient ainsi nécessiter davantage de pluie pour générer des glissements de terrain par comparaison aux versants situés sous le vent, où la pluviosité est généralement plus faible.

Concernant l'influence du climat, les seuils établis dans les régions caractérisées par un climat tropical (ex. Brésil, Hawaï et Puerto Rico) affichent des valeurs pluviométriques plus élevées par comparaison aux milieux tempérés (ex. Californie, Italie). Ceci pourrait être lié à la forte pluviosité annuelle et à la température élevée des zones tropicales, lesquelles favorisent l'altération chimique et le développement en profondeur des sols. En effet, un sol profond requiert un volume important de pluie pour se saturer et favoriser des pressions hydrauliques en excès par comparaison aux sols superficiels. Les seuils établis dans les Blue Ridge Mountains (Virginie, É.-U.) (Wiezcorek *et al.*, 2000) ainsi que dans la chaîne himalayenne du Népal et de l'Inde (Dahal et Hasegawa, 2008; Mathew *et al.*, 2013; Kanungo et Sharma, 2014) affichent également des valeurs seuils particulièrement élevées *versus* les autres seuils proposés ailleurs dans le monde. Tout comme les environnements tropicaux, la forte pluviosité annuelle de ces milieux, associée au passage d'ouragans, à la mousson et à la présence d'un effet orographique marqué, tend à augmenter les valeurs pluviométriques nécessaires au déclenchement des glissements de terrain.

Enfin, l'urbanisation et les activités anthropiques associées représentent aussi des paramètres non négligeables dans le déclenchement des glissements de terrain par les précipitations. En effet, l'anthropisation des milieux naturels tend à augmenter la fréquence des ruptures de pente (Montgomery *et al.*, 2000) tout en réduisant de manière significative la quantité de pluie requise pour ces ruptures (Au, 1998; Akcali *et al.*, 2010). À titre d'exemple, Au (1998) affirment que



640 mm de pluie sont nécessaires pour initier des glissements en milieu naturel par comparaison à seulement 420 mm en zone urbanisée. Pour Montgomery *et al.* (2000), la déforestation des versants en Oregon aurait augmenté la fréquence des glissements de terrain de trois à neuf fois pour des précipitations d'une durée et d'une intensité équivalente.

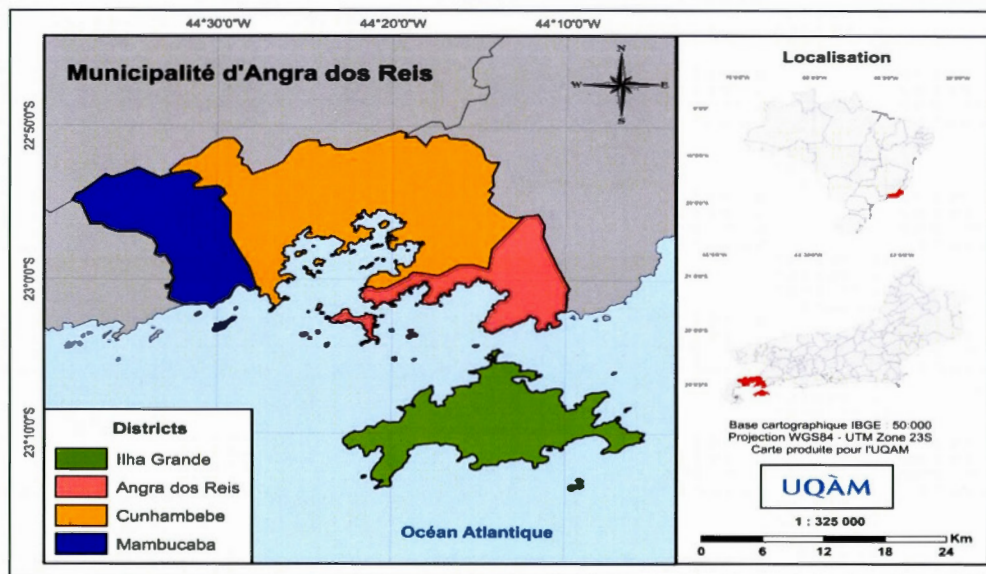
## CHAPITRE II

### LOCALISATION ET DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE

#### 2.1 Localisation des sites d'étude

##### 2.1.1 Échelle régionale

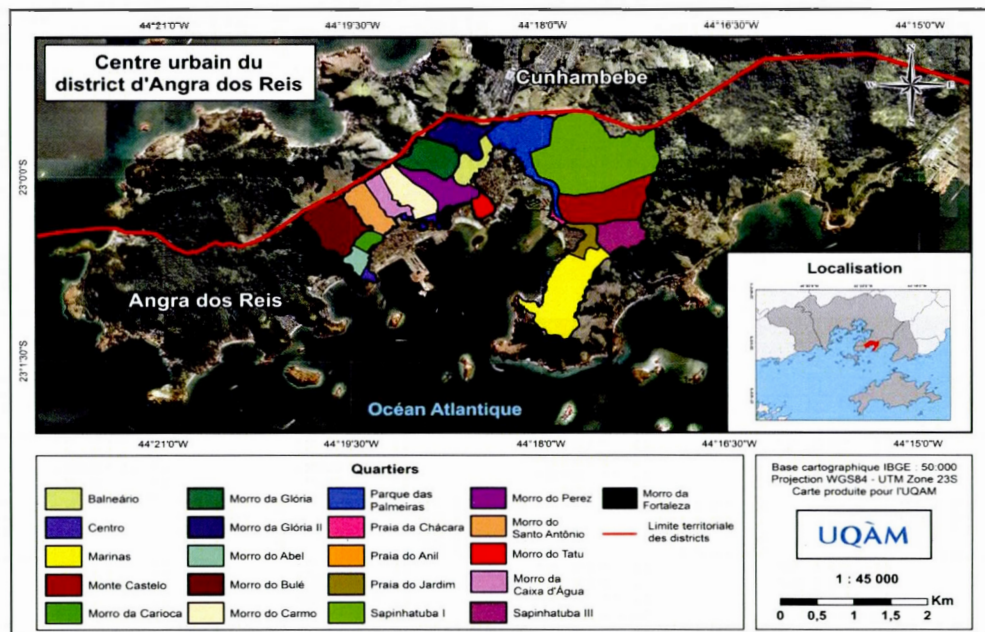
La première zone d'étude correspond à la municipalité brésilienne d'Angra dos Reis, localisée dans la partie occidentale de l'État de Rio de Janeiro (RJ) (fig. 2.1), à environ 240 km à l'est de São Paulo et 115 km à l'ouest de Rio de Janeiro. En conformité avec la loi municipale 270/L.O., entrée en vigueur le 15 avril 1993 (Angra dos Reis, 1993), la municipalité d'Angra dos Reis, d'une superficie avoisinant 825 km<sup>2</sup>, est composée de quatre districts (Angra dos Reis, Cunhambebe, Ilha Grande et Mambucaba) comprenant 116 quartiers. Le territoire est délimité à l'ouest par la municipalité de Paraty (RJ), au nord par l'État de São Paulo, à l'est par les municipalités de Rio Claro (RJ) et Mangaratiba (RJ), et au sud par l'océan Atlantique.



**Figure 2.1** Carte de localisation de la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) (23° 00' 33" S; 44° 19' 06" O) et ses districts à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).

### 2.1.2 Échelle locale

La seconde zone d'étude, qui fait partie de la municipalité d'Angra dos Reis, correspond au centre urbain du district d'Angra dos Reis (fig. 2.2). Celui-ci couvre une superficie de 6,48 km<sup>2</sup>, soit 0,84 % du territoire couvert par la région d'Angra dos Reis, et comprend 21 des 53 quartiers du district : Morro do Bulé, Morro do Abel, Morro da Carioca, Morro do Santo Antônio, Morro da Caixa d'Água, Centro, Morro do Carmo, Morro do Perez, Morro da Fortaleza, Praia do Anil, Morro do Tatu, Morro da Glória, Morro da Glória II, Balneario, Parque das Palmeiras, Praia da Chácara, Sapinhatuba I, Monte Castelo, Sapinhatuba III, Praia do Jardim, et Marinas. Situé au centre de la municipalité et à l'ouest du district d'Angra dos Reis, ce site d'étude local est bordé au nord par le district de Cunhambebe, à l'est par les quartiers de Mombaça, Camorim Pequeno et Camorim, au sud par l'océan Atlantique et le district d'Ilha Grande et à l'ouest par le quartier Colégio Naval. La zone d'étude n'inclut pas la partie très proximale à la côte qui se situe à moins de 10 mètres d'altitude par rapport au niveau de la mer du fait qu'aucun glissement de terrain n'y a été répertorié durant la période d'étude (1<sup>er</sup> janvier 2008 au 30 juin 2013) et que les données biophysiques obtenues de l'Institut Étatique de l'Environnement (INEA) ne couvrent pas cette partie du territoire.



**Figure 2.2** Carte de localisation du centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) (23° 00' 33" S; 44° 19' 06" O) et ses quartiers à des fins d'analyse locale (Fond : IBGE, 2014).



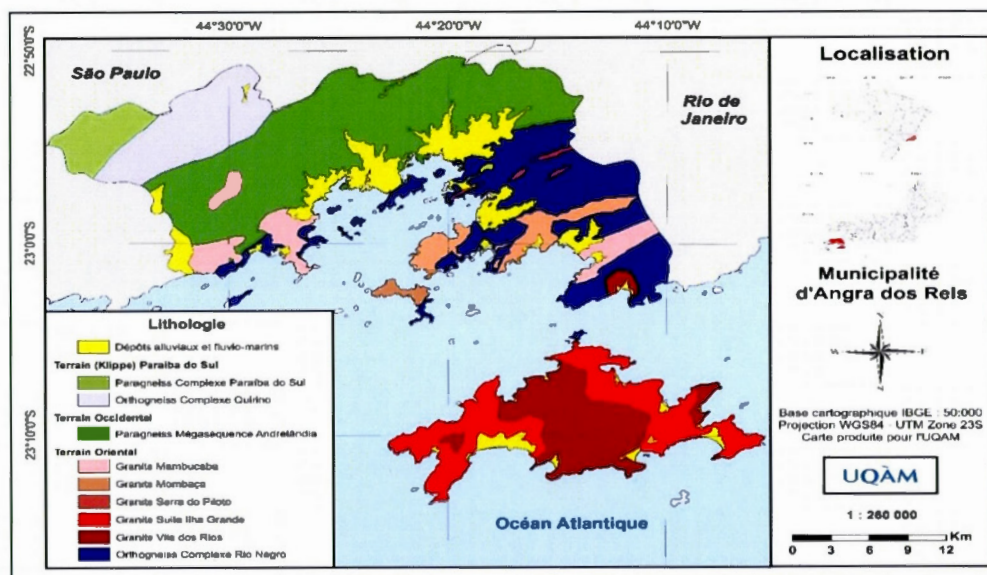
## 2.2 Caractérisation des sites d'étude

### 2.2.1 Contexte géologique

La municipalité d'Angra dos Reis est située au centre de la Province géologique Mantiqueira. La Province Mantiqueira a subi cinq orogénèses ayant plissé et faillé le matériel rocheux : Dom Feliciano (segment méridional), Apiaí, Brasília Sul et Ribeira (segment central) et Araçuaí (segment septentrional) (Tupinambá *et al.*, 2007). Plus précisément, la zone d'étude régionale résulte de l'orogénèse Ribeira, soit la collision oblique durant le Néoprotérozoïque entre le craton de São Francisco et d'autres plaques et microplaques situées au sud-est du Brésil (Heilbron *et al.*, 1995). Cette phase de collision continentale a entraîné un empilement successif des terres de l'est vers l'ouest/nord-ouest (Pedrosa-Soares et Wiedemann-Leonardos, 2000). De la sorte, l'orogénèse Ribeira est subdivisée en cinq terrains tectono-stratigraphiques séparés par des failles inverses ou des zones de cisaillement ductiles bien distinctes : Occidental, Klippe Paraíba do Sul, Embú, Oriental et Cabo Frio (Heilbron *et al.*, 2004). Les quatre premiers se sont amalgamés durant la période Édiacarienne (*ca.* 580 Ma), tandis que le terrain Cabo Frio s'est accolé plus tardivement durant le Cambrien (*ca.* 520 Ma) (Tupinambá *et al.*, 2007).

À Angra dos Reis, les roches sont composées à 30 % de granites, 27 % d'orthogneiss, 33 % de paragneiss et à 10 % de sédiments contemporains (Néogène-Quaternaire) (fig. 2.3). Les granites, composés principalement de biotite, datent de l'Édiacarien et font partie des groupes Mambucaba, Mombaça, Serra do Piloto, Vila dos Rios et de la suite Ilha Grande (charnockite), associée à la formation de l'arc magmatique Rio Negro dans le terrain Oriental (tabl. 2.1) (CPRM, 2007a). Ces roches plutoniques ne possèdent pas de foliations à l'exception des granites de la Serra do Piloto (CPRM, 2007b). Les orthogneiss présents dans le nord-ouest de la municipalité datent du Rhyacien (Paléoprotérozoïque) et sont associés au complexe Quirino de la Klippe Paraíba do Sul, tandis que les orthogneiss localisés au sud se sont plutôt formés durant le Cryogénien (Néoprotérozoïque) et sont liés au complexe Rio Negro dans le terrain Oriental (Heilbron *et al.*, 2004). Les deux possèdent une structure rubanée issue d'un métamorphisme régional et sont composés majoritairement de biotite et de hornblende (CPRM, 2007b). Les paragneiss, qui sont distribués dans le nord de la zone d'étude





**Figure 2.3** Carte lithologique de la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).

**Tableau 2.1**

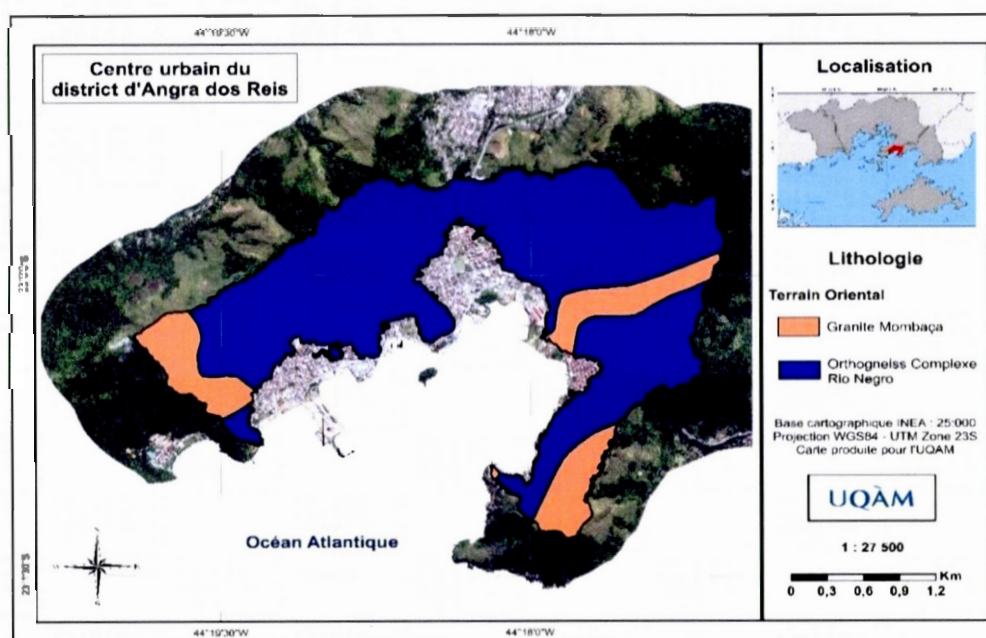
Description des unités lithologiques présentes dans la municipalité d'Angra dos Reis

Terrains tectono-stratigraphiques	Nom des unités lithologiques	Éon	Ère	Période / Système	Série	Âge maximal (Ma)	Lithologie	Classe de roche	Subcatégorie de roche
	Dépôts alluviaux et fluvio-marins	Phanérozoïque	Cénozoïque	Néogène-Quaternaire		0,0117	Gravier, sable, limon, argile	Sédimentaire	Sédiments non consolidés
(Klippe) Paraíba do Sul	Paragneiss Complexe Paraíba do Sul	Précambrien - Protérozoïque	Néo-protérozoïque	Tonien		~ 1000	Paragneiss	Métamorphique	Métamorphisme régional
	Orthogneiss Complexe Quirino	Précambrien - Protérozoïque	Paléo-protérozoïque	Rhyacien		~ 2169	Orthogneiss	Métamorphique	Métamorphisme régional
Occidental	Paragneiss Mégaséquence Andrelândia	Précambrien - Protérozoïque	Néo-protérozoïque	Tonien		~ 1000	Paragneiss	Métamorphique	Métamorphisme régional
Oriental	Granite de Mambucaba	Phanérozoïque	Paléozoïque	Cambrien	Terreneuvien	~ 541	Granite	Ignée	Plutonique
	Granite de Mombaca	Phanérozoïque	Paléozoïque	Cambrien	Terreneuvien	~ 541	Granite	Ignée	Plutonique
	Granite Serra do Piloto	Précambrien - Protérozoïque	Néo-protérozoïque	Édiacarien		~ 635	Granite	Ignée	Plutonique
	Granite Suite Ilha Grande	Précambrien - Protérozoïque	Néo-protérozoïque	Édiacarien		~ 635	Granite	Ignée	Plutonique
	Granite Vila dos Rios	Phanérozoïque	Paléozoïque	Cambrien	Terreneuvien	~ 541	Granite	Ignée	Plutonique
	Orthogneiss Complexe Rio Negro	Précambrien - Protérozoïque	Néo-protérozoïque	Cryogénien		~ 790	Orthogneiss	Métamorphique	Métamorphisme régional

\* : unités lithologiques présentes dans le centre urbain d'Angra dos Reis (Sources : CPRM, 2007a, b; IBGE, 2014).

régionale, datent du Tonien (Néoprotérozoïque) et sont associés à la mégaséquence Andrelândia du terrain Occidental et au complexe Paraíba do Sul de la Klippe Paraíba do Sul (Tupinambá *et al.*, 2007). Ce sont essentiellement des gneiss à biotite ainsi que des gneiss à sillimanite et grenat dont la structure est linéaire (Tricart, 1979; CPRM, 2007b). Enfin, les sédiments contemporains (Cénozoïque) sont distribués le long de la côte et représentent des dépôts alluviaux et fluvio-marins non consolidés composés de graviers, sables, limons et argiles (Guerra *et al.*, 2013).

À l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis, on retrouve deux unités lithologiques appartenant au terrain Oriental (fig. 2.4; tabl. 2.1). La principale, qui couvre 77 % de la zone d'étude locale, est l'orthogneiss à biotite et hornblende du complexe Rio Negro, associé au métamorphisme des roches granitiques durant la phase *pré-collisionnelle* ayant mené à la formation de l'arc magmatique Rio Negro il y a approximativement 790 Ma (CPRM, 2007a). La seconde, qui occupe 23 % du territoire, est représentée par les granites à biotite du groupe Mombaça, générés durant l'étape *post-collisionnelle* caractérisée par un effondrement extensionnel de la ceinture orogénique il y a environ 520 Ma (CPRM, 2007b).



**Figure 2.4** Carte lithologique du centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).



En ce qui a trait aux sols de la région, ils sont caractérisés par la présence d'affleurements rocheux, de dépôts fluvio-marins, de zones de remblaiement, de colluvions, de saprolites superficiels et de saprolite épais (COPPETEC, 2011). Les saprolites superficielles ont une épaisseur inférieure à deux mètres, possèdent une grande quantité de blocs rocheux et sont généralement localisés sur des versants très abrupts où affleure la roche-mère. Les saprolites épais, associés aux hauts et bas de versants, ont quant à eux une épaisseur supérieure à deux mètres et résulte d'une importante altération chimique des roches *in situ* favorisée par la forte chaleur et l'humidité élevée. Enfin, les colluvions sont épaisses avec un fort volume de blocs et sont principalement situées dans les zones concaves des pieds de versants (De Castro, 2012).

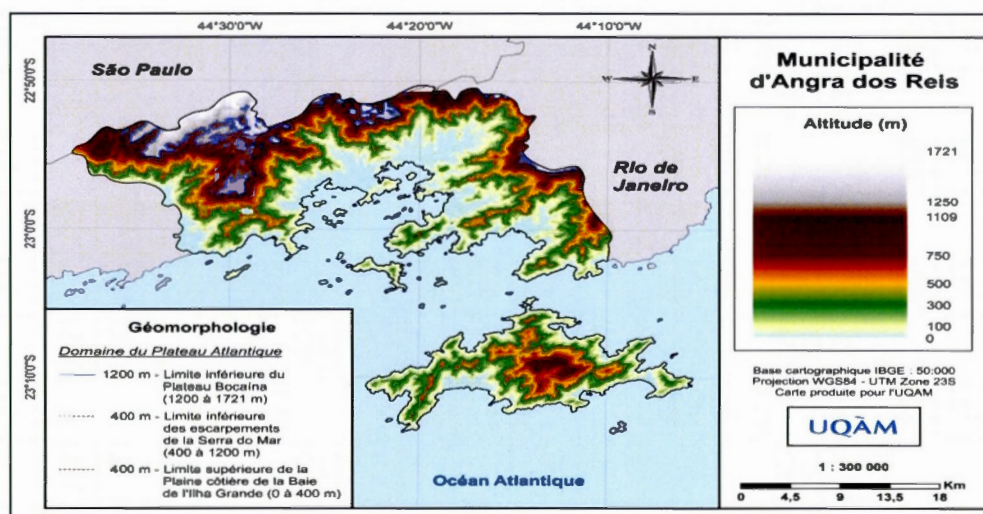
### 2.2.2 Contexte géomorphologique

La partie occidentale de l'État de Rio de Janeiro appartient à la région physiographique de la Serra do Mar qui s'étend sur un peu plus de 1 000 000 km le long du littoral sud et sud-est brésilien (De Almeida et Carneira, 1998). Cette chaîne de montagnes, qui forme une énorme barrière tectonique parallèle à la côte, est caractérisée dans la région par deux grands domaines morphologiques : 1) le domaine morpho-structural des dépressions tectoniques du Cénozoïque associé à la vallée de la rivière Paraíba do Sul (400 à 600 m d'altitude) au nord; et 2) le domaine morpho-structurale du Plateau Atlantique (400 à 2100 m d'altitude) au sud (CPRM, 2007a). Le reste de la région physiographique est occupée par une plaine côtière qui s'étend de l'océan aux montagnes (0 à 400 m d'altitude) et qui ne dépasse pas 30 km de largeur (Guerra *et al.*, 2013). La Serra do Mar est issue de mouvements tectoniques ayant débuté il y a approximativement 80 millions d'années (Crétacé supérieur) avec un soulèvement épirogénique du bouclier cristallin dans tout le sud-est du Brésil (Ferrari et Mansur, 2012). Avec une augmentation du soulèvement d'un côté, il y eut une rupture et conséquemment un affaissement des blocs adjacents par failles normales, créant des vallées par subsidence tectonique (grabens) bordées par des zones plus élevées (horsts) et reliées par des escarpements très abrupts (De Almeida et Carneira, 1998). Les zones affaissées se sont ensuite remplies de sédiments durant le Paléocène et l'Éocène (65 à 35 Ma) pour former des bassins sédimentaires (Ferrari et Mansur, 2012). Depuis, les processus tectoniques ayant donné naissance à la Serra do Mar ont été accompagné de processus d'érosion des sols (Guerra *et al.*, 2013). La présence

de nombreux talus d'éboulis et de colluvions sur le territoire de la municipalité d'Angra dos Reis témoigne de la récurrence historique du phénomène, et par conséquent, du contrôle exercé par les glissements de terrain dans l'évolution récente et actuelle du relief (De Ploey et Cruz, 1979; Fernandes *et al.*, 2004).

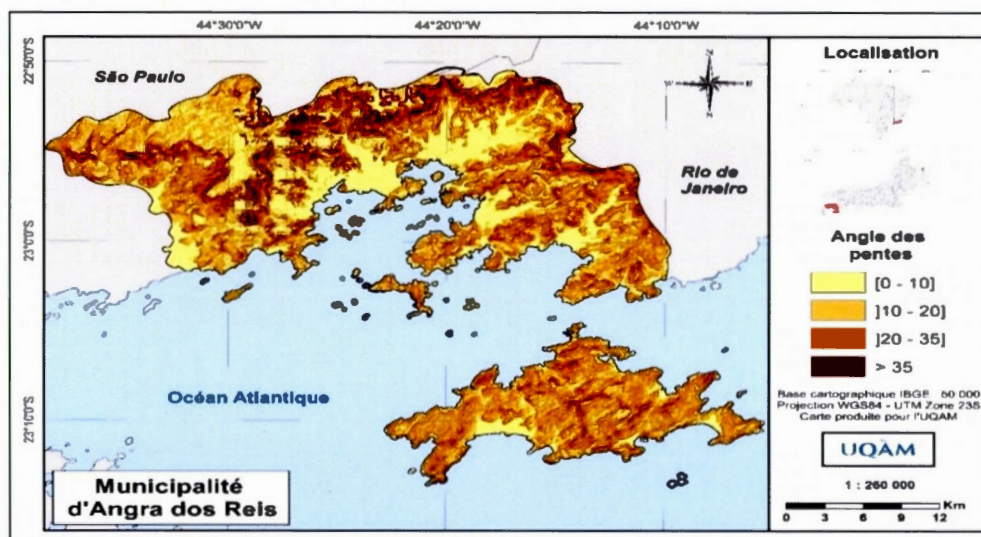
La municipalité d'Angra dos Reis fait partie du domaine du Plateau Atlantique. On y distingue trois unités géomorphologiques : le Plateau Mantiqueira, les dépressions « interplateaux » de la vallée médiane de la rivière Paraíba do Sul et le Plateau Bocaína (CPRM, 2007b). La municipalité à l'étude se situe plus exactement dans la partie méridionale du Plateau Atlantique qui correspond à la région du Plateau Bocaína et qui inclut les escarpements de la Serra do Mar et l'étroite plaine côtière de la Baie de l'Ilha Grande.

D'abord, le segment du Plateau Bocaína, situé au nord-ouest de la municipalité, est caractérisé par des plateaux suspendus intensément disséqués dont l'altitude varie entre 1200 et 1721 m (fig. 2.5) (CPRM, 2007a). Les vallées sont généralement larges et peu encaissées, toujours intercalées de ruptures dans le profil longitudinal (*knickpoints*) (Heilbron *et al.*, 2004). Les pentes y sont modérément inclinées (10 à 35°), mais peuvent facilement surpasser les 35° par endroit (fig. 2.6). Le domaine est affecté par une forte activité géomorphologique comme en témoignent les cicatrices de glissements de terrain sur les versants et les talus d'éboulis et les amas de colluvions à leur base (CPRM, 2007b).



**Figure 2.5** Modèle numérique d'élévation pour la municipalité d'Angra dos Reis à des fins d'analyse régionale (Fond : INEA, 2013).



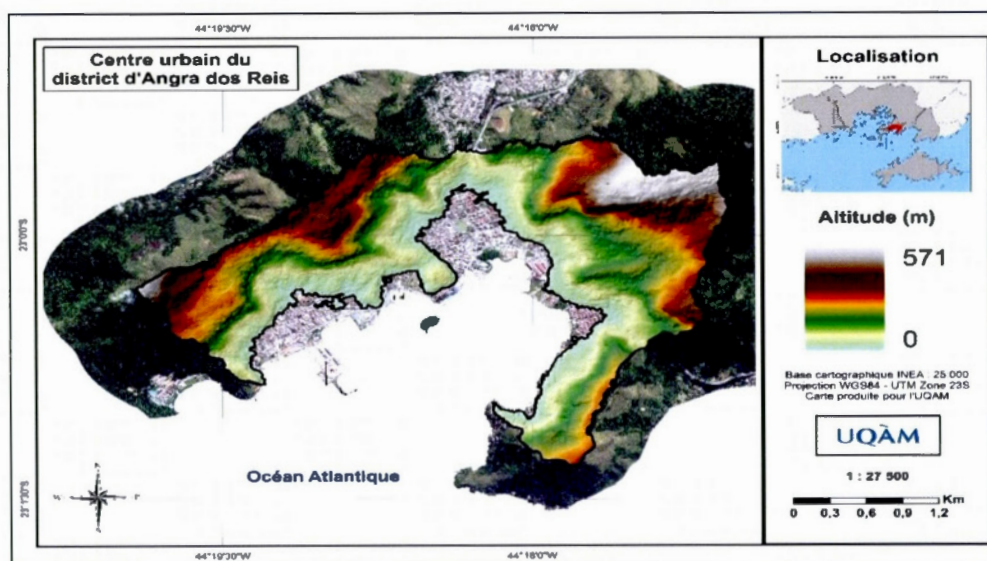


**Figure 2.6** Carte illustrant l'angle des pentes (en degrés) dans la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).

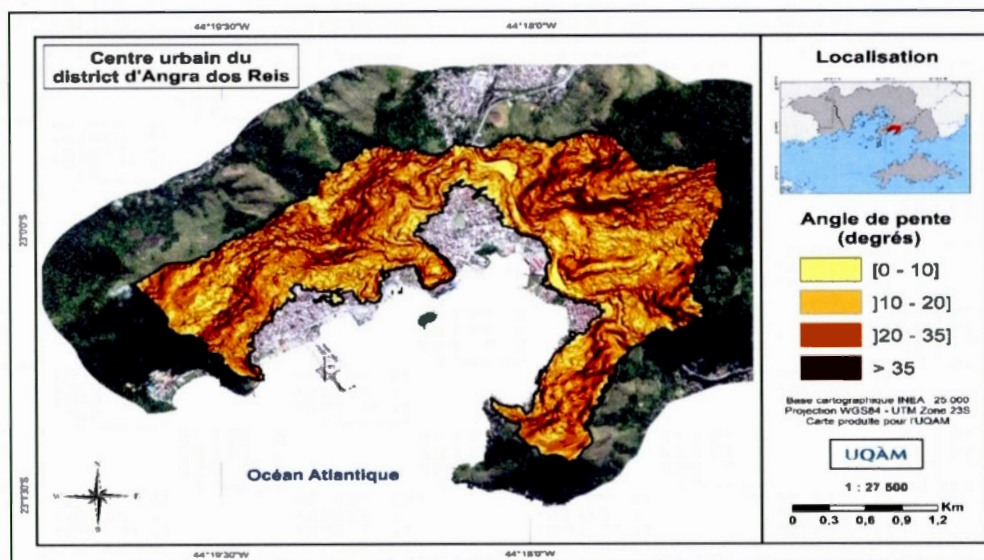
Le Plateau Bocaína est délimité au sud par un important escarpement dont le front très abrupt donne sur l'océan. La limite inférieure de l'escarpement se situe aux alentours de 400 m d'altitude, tandis que la limite supérieure, qui correspond au début du Plateau Bocaína, culmine à près de 1200 m d'altitude (fig. 2.5). Les versants, fortement inclinés ( $>35^\circ$ ) et où affleure fréquemment la roche-mère, sont régulièrement affectés par des mouvements de masse rapides qui alimentent en sédiments, le fond des vallées ainsi que les plaines côtières du domaine de la Baie de l'Ilha Grande (CPRM, 2007a). Le centre urbain d'Angra dos Reis, caractérisé par un sommet culminant à 571 m d'altitude (fig. 2.7) et des pentes très abruptes (fig. 2.8), fait partie de cette unité géomorphologique.

Ensuite, le domaine de la Baie de l'Ilha Grande, dont l'hypsométrie varie entre 0 et 400 m d'altitude, correspond essentiellement aux plaines côtières composées de sédiments continentaux et marins issues de la dynamique fluviale, marine et lagunaire durant le Néogène-Quaternaire (CPRM, 2007b). De par sa topographie peu accidentée où la majorité des pentes sont inférieures à  $5^\circ$ , ce domaine subit peu d'érosion et est dominé par un processus géomorphologique d'apport sédimentaire alimenté par les cours d'eau de la Serra do Mar s'écoulant vers l'océan (Guerra *et al.*, 2013). La granulométrie passe de grossière à fine en fonction d'un rapprochement avec la côte associé à une transition de la dynamique fluviale à fluvio-marine (CPRM, 2007a). Dans les zones proximales à la côte, sujettes aux inondations et

battements des marées, il est commun de retrouver des mangroves (De Castro, 2012). Le massif montagneux orienté est-ouest de l'Ilha Grande, qui culmine à 1031 m d'altitude, est également inclus dans cette unité géomorphologique. Le massif possède des versants très inclinés et riches en parois rocheuses, des canaux fluviaux bien encaissés et d'importants talus associés à des processus gravitaires (CPRM, 2007b).



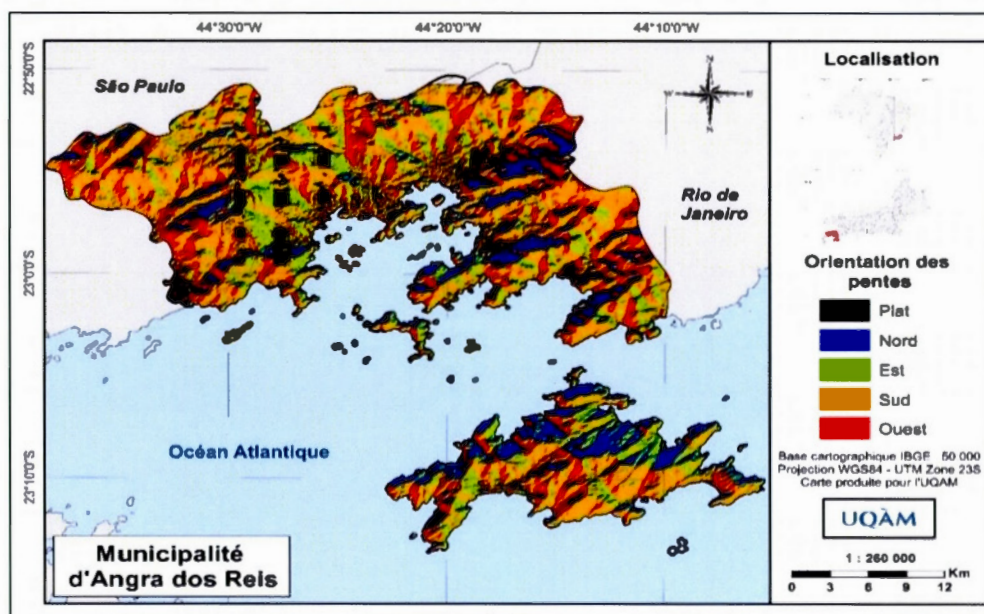
**Figure 2.7** Modèle numérique d'élévation pour le centre urbain d'Angra dos Reis à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).



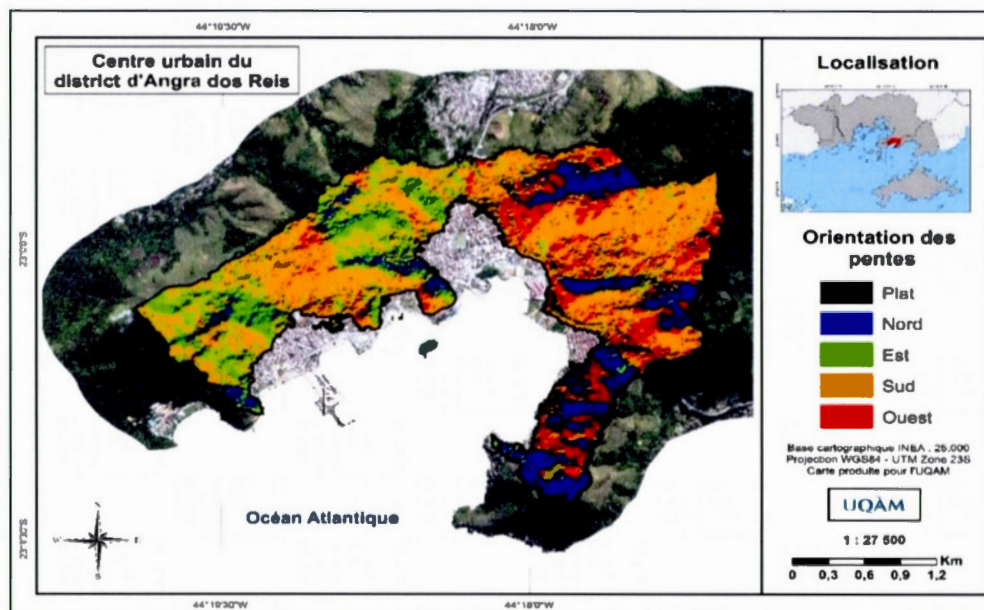
**Figure 2.8** Carte illustrant l'angle des pentes (en degrés) dans le centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).



Enfin, compte tenu de l'alignement est-ouest des montagnes dans cette portion de la Serra do Mar, les versants de la municipalité d'Angra dos Reis sont essentiellement orientés vers le nord et le sud et ce, tant à l'échelle régionale (fig. 2.9) que locale (fig. 2.10).



**Figure 2.9** Carte illustrant l'orientation des pentes dans la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).



**Figure 2.10** Carte illustrant l'orientation des pentes dans le centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).

### 2.2.3 Contexte climatique

Le climat de la municipalité d'Angra dos Reis est particulièrement variable à l'échelle locale en raison d'une proximité avec l'océan Atlantique et d'un relief accidenté associé aux montagnes de la Serra do Mar. Selon la classification de Köppen-Geiger mise à jour par Kottek *et al.* (2006), la région est caractérisée par un climat de type Af, soit un climat tropical humide sans saison sèche bien définie. Ceci correspond à des températures moyennes mensuelles supérieures à 18°C et des précipitations moyennes mensuelles supérieures à 60 mm.

Le régime des températures de la municipalité est caractérisé par de grandes amplitudes thermiques en raison des caractéristiques topographiques locales. La température dans la zone proximale à la côte varie entre 16 et 40°C, avec une moyenne annuelle de 23°C (Eletronuclear, 2005). En contrepartie, la zone associée aux montagnes de la Serra do Mar possède une température variant entre 5 et 38°C, avec une moyenne annuelle plus fraîche d'environ 17°C (Mazza, 2007). En d'autres mots, Angra dos Reis possède un été particulièrement chaud et un hiver relativement doux.

Le régime pluviométrique d'Angra dos Reis est caractérisé par une forte pluviosité annuelle variant entre 2000 et 2500 mm (Soares *et al.*, 2014). La région se distingue par son régime typique des régions tropicales, soit une période de fortes précipitations à l'été (décembre à mars) et une période de précipitations moindres à l'hiver (juin à août) (Guidicini et Iwasa, 1977; Vieira *et al.*, 2010). En effet, les indices pluviométriques les plus élevés sont enregistrés durant les mois de décembre à mars, avec des précipitations moyennes supérieures à 250 mm et environ 16 jours de pluie, tandis que les indices les plus faibles sont obtenus en juin et juillet, avec des précipitations totales avoisinants 80 mm et moins de 10 jours de pluie (Eletronuclear, 2005). Durant la saison des pluies, qui concentre près de 60 % des précipitations annuelles (Vieira *et al.*, 2010), les pluies de 200 à 300 mm en 24 à 48 heures sont fréquentes (Fernandes *et al.*, 2004). Ces précipitations intenses sont par ailleurs en grande partie responsables de la fréquence élevée des glissements de terrain dans cette partie du Brésil (De Souza et Ebecken, 2012; Ribeiro *et al.*, 2013).

L'intensité et la distribution des précipitations sont influencées par divers facteurs statiques et dynamiques (Mazza, 2007). Les facteurs dynamiques font référence aux différentes masses



d'air et à leur mode de circulation comme, entre autres, les systèmes frontaux, l'Anticyclone Subtropical de l'Atlantique Sud (ASAS) et la Zone de Convergence de l'Atlantique Sud (ZCAS) (Nimer, 2009). Les facteurs statiques correspondent plutôt à l'emplacement géographique (la position latitudinale et la proximité maritime qui facilite la radiation solaire, l'évaporation et la formation de nuages) ainsi qu'aux caractéristiques topographiques (élévation et orientation perpendiculaire des montagnes de la Serra do Mar par rapport aux courants atmosphériques qui favorisent le développement d'orages intenses par le soulèvement orographique des masses d'air humides polaires soufflant en direction du nord-ouest) (Soares *et al.*, 2014). De la sorte, les zones côtières et les versants orientés face au vent (exposés au sud) tendent à être plus humides (2000 à 2500 mm/an) en raison des précipitations orographiques, tandis que les versants sous le vent (exposés au nord) sont généralement plus secs (1400 à 1700 mm/an) de par la perte d'humidité liée à l'advection des masses d'air au-dessus des montagnes (Guerra *et al.*, 2013).

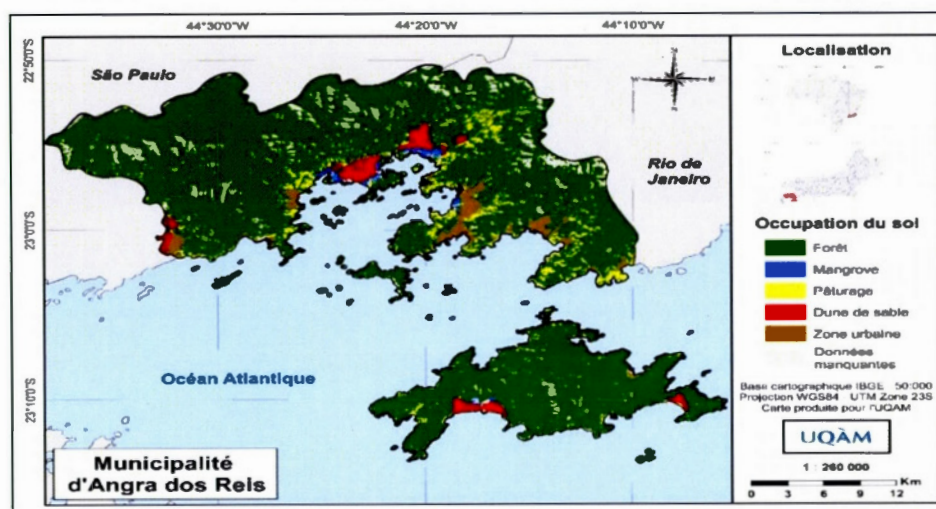
### 2.2.3 Occupation du sol

La forte croissance démographique depuis le début des années 1970<sup>1</sup> à Angra dos Reis, liée à la construction de l'autoroute du Gouverneur Mario Covas (Br-101) et des usines nucléaires *Angra 1* et *Angra 2* (Bortoloti, 2010), a généré une pression importante sur l'environnement physique. Toutefois, la topographie accidentée de la municipalité (7,45 % de plaines et 92,5 % de collines/montagnes), qui limite la superficie des terres disponibles et convenables à l'implantation humaine, ainsi que l'absence d'une réglementation relative à l'aménagement du territoire ont occasionné un développement chaotique du territoire (Pocidonio et da Silva, 2011). Ce développement désordonné a mené à de la déforestation, à l'imperméabilisation des surfaces, à la transformation de plateaux en pâturages et au développement résidentiel sur des versants raides, générant de surcroît une accumulation de déchets, un changement des conditions naturelles de drainage ainsi que des activités anthropiques de remblaiement et d'excavation qui ont affecté la stabilité des pentes et augmenté la probabilité d'occurrence des glissements de terrain (Fernandes *et al.*, 2004). Par conséquent, la couverture biophysique de

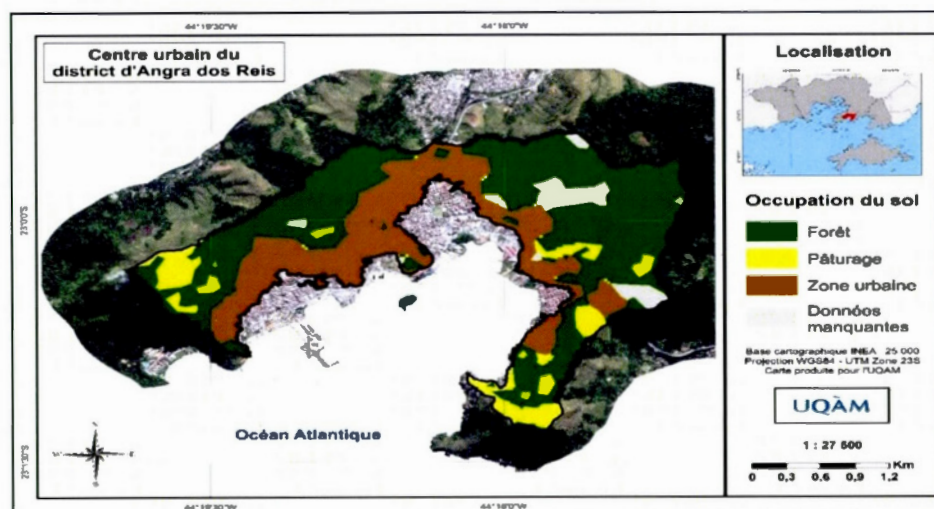
---

<sup>1</sup> La population a plus que quadruplé entre 1970 et 2010, passant de 40 200 habitants à 169 511 (Dos Santos, 2007; IBGE, 2014)

la municipalité d'Angra dos Reis, qui était autrefois entièrement constitué de Forêt atlantique (*Mata atlântica*) à son état originel (IBGE, 2014), est dorénavant beaucoup plus diversifiée. En effet, elle est aujourd'hui composée à 86 % de Forêt atlantique secondaire, 4 % de pâturages, 3 % de zones urbaines, 2 % de dunes, 1 % de mangroves, tandis que le reste du territoire (4 %) n'est pas défini (fig. 2.11). À l'échelle du centre urbain, c'est plutôt 56 % du territoire qui est couvert de forêt secondaire, 30 % de zones urbaines, 9 % de pâturages, alors que le reste (5 %) correspond à des données manquantes (fig. 2.12).



**Figure 2.11** Carte illustrant l'occupation du sol dans la municipalité d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse régionale (Fond : IBGE, 2014).



**Figure 2.12** Carte illustrant l'occupation du sol dans le centre urbain d'Angra dos Reis (RJ) à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).

## CHAPITRE III

### MÉTHODOLOGIE

#### 3.1 Données pluviométriques

Les informations pluviométriques ont été recueillies à partir d'un réseau régional composé de deux pluviographes administrés par l'Institut Étatique de l'Environnement (INEA) et de 19 pluviomètres gérés par la Défense Civile d'Angra dos Reis. Dans le cas des pluviographes de l'INEA, des enregistrements automatiques sont effectués aux 15 minutes, soit 96 fois par jour. Les données couvrent une période de 774 jours allant du 19 mai 2011 à 13h30 au 30 juin 2013 à minuit. En ce qui a trait aux pluviomètres de la Défense Civile, les données sont journalières et le relevé est effectué manuellement tous les matins à 9h00. La période couverte par les jeux de données varie toutefois considérablement en fonction de la station pluviométrique. De plus, plusieurs séries sont incomplètes (tabl. 3.1).

Compte tenu de l'hétérogénéité des données recueillies, deux périodes d'étude distinctes sont considérées, soit une propre aux deux zones d'études (municipalité et centre urbain) et l'autre unique au centre urbain d'Angra dos Reis (tabl. 3.2). La première, qui s'étend du 2 décembre 2007 au 31 mars 2013, va permettre l'établissement de seuils pluviométriques locaux et régionaux à partir d'enregistrements journaliers provenant de l'ensemble des stations pluviométriques. Elle inclut les glissements survenus entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 tout en considérant 30 jours antécédents de données pluviométriques. La seconde période d'étude, qui s'étend du 19 avril 2011 au 30 juin 2013, va permettre l'établissement de seuils pluviométriques dans le centre urbain d'Angra dos Reis à partir d'enregistrements aux 15 minutes récoltés par la station *Angra*. Ces seuils, qui considèrent les glissements survenus entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 en plus de 30 jours de précipitations antécédentes, seront ensuite comparés aux seuils locaux journaliers précédemment établis dans le centre urbain d'Angra dos Reis afin d'évaluer l'effet de la fréquence des enregistrements pluviométriques.



**Tableau 3.1**  
Informations sur les stations pluviométriques employées dans cette étude à des fins d'analyse locale et régionale

Régions pluviométriques (après agrégation)	Stations pluviométriques	Longitude	Latitude	Altitude (m)	District	Quartier	Gestion	Début des données	Fin des données	Séries incomplètes
Mambucaba	Fazenda Fortaleza	44°33'39.10 O	22°57'23.00 S	19	Mambucaba	Sertão de Mambucaba	INEA	25 mai 2012 - 16h00	30 juin 2013	Non
	Boa Vista - Voluntário Marcos Alves	44°31'39.09 O	23°01'03.09 S	32	Mambucaba	Boa Vista	Défense Civile	1er avril 2009	30 avril 2013	Oui
	Parque Mambucaba - Voluntária Ritamar	44°31'51.80 O	23°00'45.14 S	7	Mambucaba	Parque Mambucaba	Défense Civile	1er juillet 2005	31 juillet 2012	Oui
	Parque Mambucaba - Região Administrativa	44°32'27.14 O	23°00'45.51 S	6	Mambucaba	Parque Mambucaba	Défense Civile	18 janvier 2011	30 juin 2013	Oui
	Parque Mambucaba - Itapicui - Marcos Alves	44°32'23.90 O	23°00'16.43 S	8	Mambucaba	Parque Mambucaba	Défense Civile	1er janvier 2009	30 avril 2013	Oui
Bracuí	Bracuí - Voluntária Aparecida	44°23'16.14 O	22°56'06.78 S	6	Cunhambebe	Bracuí	Défense Civile	1er janvier 2006	30 novembre 2012	Oui
	Bracuí - Centro de Recuperação	44°23'54.75 O	22°56'18.70 S	11	Cunhambebe	Santa Rita do Bracuí	Défense Civile	1er avril 2003	31 août 2012	Oui
	Frade - Júdice	44°26'12.40 O	22°57'48.34 S	13	Cunhambebe	Frade	Défense Civile	1er avril 2003	31 mars 2013	Oui
Serra D'água	Serra D'água	44°16'46.17 O	22°53'27.81 S	22	Cunhambebe	Serra D'Água	Défense Civile	1er avril 2003	31 mars 2013	Oui
Japuíba	Areal-Voluntário (Pedro)	44°17'46.21 O	22°59'04.88 S	24	Cunhambebe	Areal	Défense Civile	1er janvier 1996	30 avril 2013	Oui
	Japuíba - Aldo	44°18'05.55 O	22°58'12.12 S	8	Cunhambebe	Aeroporto	Défense Civile	1er janvier 2011	30 avril 2013	Oui
	Parque Belém - Regional	44°17'16.77 O	22°59'24.04 S	7	Cunhambebe	Parque Belém	Défense Civile	1er janvier 2012	30 novembre 2012	Oui
Angra dos Reis	Angra	44°18'55.89 O	23°00'04.12 S	215	Angra dos Reis	Morro do Perez	INEA	19 mai 2011 - 13h30	30 juin 2013	Non
	Marinas - Voluntário Orli	44°17'48.35 O	23°00'45.37 S	51	Angra dos Reis	Marinas	Défense Civile	1er janvier 2007	31 mars 2011	Oui
	Voluntária Vera	44°21'03.54 O	23°01'14.33 S	28	Angra dos Reis	Vila Velha	Défense Civile	1er octobre 2010	30 avril 2013	Oui
	Voluntário Sr. Valmir	44°18'43.49 O	22°59'54.56 S	92	Angra dos Reis	Morro da Glória	Défense Civile	1er avril 2003	30 avril 2011	Oui
	Centro São Bento - Base I	44°19'19.67 O	23°00'42.58 S	7	Angra dos Reis	Centro	Défense Civile	1er janvier 1996	30 juin 2013	Non
Jacuacanga	Monsuba - Voluntário Sr. Raimundo	44°13'04.17 O	23°00'36.53 S	11	Angra dos Reis	Monsuba	Défense Civile	1er avril 2003	30 avril 2013	Oui
	Jacuacanga Marina	44°14'54.46 O	22°59'55.70 S	6	Angra dos Reis	Verolme	Défense Civile	1er avril 2003	31 janvier 2011	Oui
	Verolme S.A. - Valério	44°15'47.94 O	22°59'25.77 S	67	Angra dos Reis	Camorim	Défense Civile	1er avril 2003	30 avril 2013	Oui
	Camorim - Voluntário Sr.Nezinho	44°13'31.68 O	23°01'19.98 S	22	Angra dos Reis	Paraiso	Défense Civile	1er avril 2003	30 avril 2013	Oui
	Voluntária Roseni	44°13'31.68 O	23°01'19.98 S	22	Angra dos Reis	Paraiso	Défense Civile	1er avril 2003	30 avril 2013	Oui



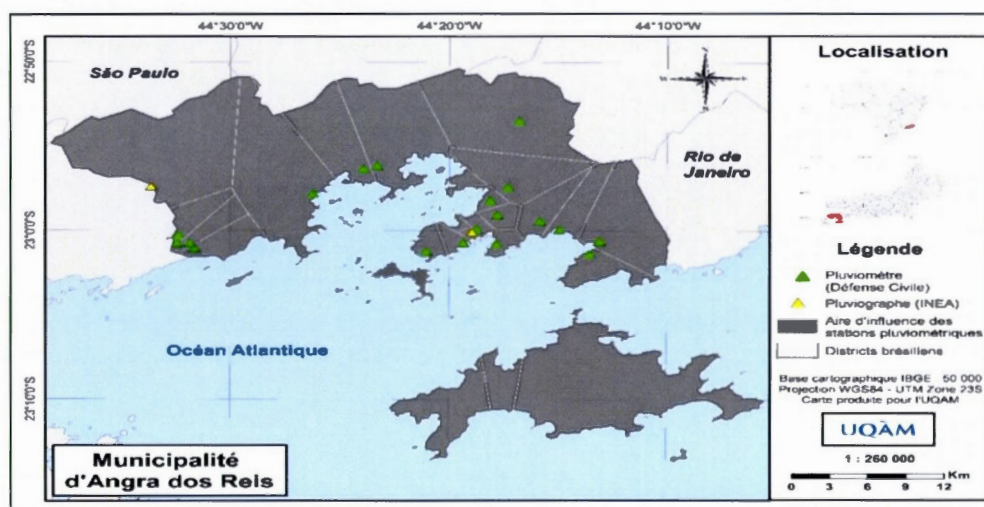
**Tableau 3.2**  
Cadre spatio-temporel de l'étude

Types de données	Zones et périodes d'études	
	Municipalité d'Angra dos Reis	Centre urbain d'Angra dos Reis
Enregistrements journaliers	2 décembre 2007 au 31 mars 2013*	2 décembre 2007 au 31 mars 2013*
Enregistrements aux 15 minutes	-----	19 avril 2011 au 30 juin 2013*

\* : les périodes incluent 30 jours de données pluviométriques antécédentes à la première date présente au registre des glissements de terrain.

### 3.1.1 Identification des régions pluviométriques

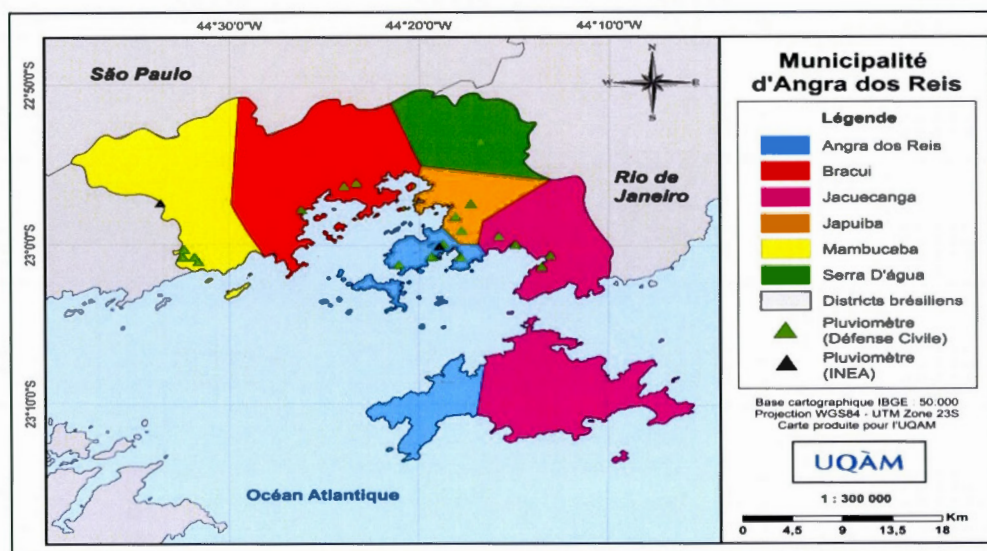
Afin de pouvoir estimer la quantité de pluie responsable de l'occurrence de chacun des glissements de terrain répertoriés, la zone d'étude régionale a d'abord été partitionnée et une aire d'influence a été calculée pour chaque station en utilisant la technique des polygones de Thiessen (Thiessen et Alter, 1911) à l'aide du logiciel ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013) (fig. 3.1).



**Figure 3.1** Localisation et aire d'influence des stations pluviométriques situées dans la municipalité d'Angra dos Reis avant l'agrégation des données (Fond : IBGE, 2014).

Ensuite, les bases de données associées aux 21 stations pluviométriques ont été agglomérées en fonction de leur proximité géographique et ce, de manière à obtenir des séries temporelles complètes pour la période allant du 2 décembre 2007 au 30 juin 2013; soit la période couverte par le registre des glissements de terrain (1<sup>er</sup> janvier 2008 au 30 juin 2013) incluant 30 jours de précipitations antécédentes cumulées avant la première mention. Pour l'analyse des données

journalières, la date finale a été ramenée au 31 mars 2013 étant donné que plusieurs séries ne couvrent pas la période du 1<sup>er</sup> avril au 30 juin 2013. Par conséquent, six régions pluviométriques ont été identifiées après l'agrégation des séries de données et des aires d'influences propres aux stations pluviométriques (polygones de Thiessen) (fig 3.2), causant ainsi une régionalisation des tendances pluviométriques dans la municipalité d'Angra dos Reis.



**Figure 3.2** Régions pluviométriques identifiées (Mambucaba, Bracuí, Serra D'água, Japuiba Jacuecanga et Angra dos Reis) après l'agrégation des séries de données et des aires d'influence (Fond : IBGE, 2014).

À titre d'exemple, pour la région pluviométrique nommée *Bracuí*, les données provenant de trois stations ont été agglomérées, soit *Bracuí-Voluntária Aparecida*, *Bracuí-Centro de Recuperação* et *Frade-Júdice* (tabl. 3.1). L'agrégation des données a été effectuée en calculant la moyenne arithmétique journalière des données. Dans les cas des régions *Mambucaba* et *Angra dos Reis*, où il existe des enregistrements aux 15 minutes pour la période allant du 19 mai 2011 au 30 juin 2013, ces données plus précises ont été préférées à l'agrégation par moyenne arithmétique. De la sorte, pour la période du 2 décembre 2007 au 18 mai 2011 la moyenne arithmétique a été employée, alors que pour la période du 19 mai 2011 au 31 mars 2013 les données issues des pluviographes ont été privilégiées. Pour obtenir des données journalières, les 96 enregistrements recueillis sur une période de 24 heures ont été cumulés. Ce cumul journalier a débuté à 9h00 plutôt qu'à minuit (00h00) dans le but d'obtenir des données conformes à celles provenant des pluviomètres journaliers.



### 3.1.2 Traitements des données

Dans l'objectif d'établir des seuils pluviométriques ( $ED$  et  $ED$  normalisés par la moyenne pluviométrique annuelle) et d'estimer l'influence des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain, différentes variables pluviométriques ont été quantifiées pour chaque région pluviométrique et ce, à partir des valeurs journalières obtenues suite au processus d'agrégation.

Tout d'abord, les données journalières ( $R$ ) de chaque station ont été associées (ou non) à un évènement pluviométrique, soit une période plus ou moins continue de précipitations. Un évènement pluviométrique débute lorsqu'au moins deux millimètres de pluie ont été cumulés en 24 heures et se termine au début d'une période d'au moins 24 heures sans précipitation. Il est à noter qu'aucun standard universel n'existe à ce jour quant à la définition d'un évènement pluviométrique et ce, même si celle-ci peut grandement affecter les seuils proposés et limiter l'exportation de ceux-ci à d'autres régions (Aleotti, 2004). Une fois les évènements pluviométriques identifiés, la durée ( $D$ ) en heures et les précipitations totales ( $E$ ) en millimètres de chaque épisode ont pu être calculées. Ces valeurs ont ensuite servi à l'établissement de seuils fondés sur la durée des épisodes pluviométriques ( $ED$ ).

Dans un deuxième temps, les précipitations annuelles pour chaque région pluviométrique ont été calculées afin de permettre l'établissement de seuils normalisés via la moyenne pluviométrique annuelle ( $E_{MAPD}$ ) et ainsi favoriser la comparaison avec des seuils d'autres régions. Les précipitations cumulées lors des épisodes pluviométriques ( $E$ ) ont été divisées par la moyenne pluviométrique annuelle ( $MAP$ ) associée au pluviomètre en question et à l'année d'occurrence de l'évènement. Afin de donner davantage d'information sur les conditions pluviométriques ayant sévi durant les périodes d'étude considérées, les précipitations mensuelles ont également été compilées.

Enfin, à chaque précipitation journalière ( $R$ ) ont été associées des valeurs de précipitations antécédentes. Les précipitations antécédentes correspondent ici aux totaux journaliers cumulés sur 3, 5, 10, 15 et 30 jours avant la précipitation journalière considérée ( $A_{(3j), (5j), (10j), (15j), (30j)}$ ). Ces données vont permettre d'évaluer le rôle des précipitations antécédentes dans le

déclenchement des glissements de terrain et déterminer, si tel est le cas, la période antécédente la plus significative.

### 3.2 Base de données des glissements de terrain

Le registre des glissements de terrain inclut tous les glissements s'étant produits sur le territoire de la municipalité d'Angra dos Reis. À la base, l'inventaire réalisé par la Défense civile comprend 3574 glissements survenus entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 30 juin 2013. Les informations incluses sont les coordonnées géographiques des glissements et la date d'occurrence. Toutefois, le registre ne permet pas de distinguer les différents mouvements de masse (glissement, écoulement, etc.). Par conséquent, sont considérés ici tous les types de glissements de terrain, sans distinction particulière. Ceci est une approche bien établie (Zêzere *et al.*, 2005; Brunetti *et al.*, 2010) et avantageuse considérant le fait que la typologie des glissements est inconnue, non-spécifiée ou incertaine étant donné que plusieurs rapports proviennent de citoyens, journalistes ou techniciens sans une formation scientifique adéquate.

#### 3.2.1 Validation et caractérisation des glissements de terrain

Les 3574 glissements de terrain ont été géoréférencés et compilés dans une base de données géographique à l'aide du logiciel ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013). Chaque glissement a ensuite été scruté de manière à éliminer les cas problématiques. Ainsi, les glissements dupliqués, soit ceux possédant des coordonnées géographiques et une date d'occurrence identiques, ont été retirés de la base de données. Il en va de même pour les cas dont la géolocalisation est erronée. Au final, cette validation a fait chuter le nombre de glissements de terrain de 3574 à 3006.

Ensuite, tous les glissements de terrain ont été caractérisés en fonction de leur géolocalisation et des attributs biophysiques de la région. Ainsi, ont été attribués une valeur altitudinale, une spécificité lithologique et d'occupation du sol, une valeur de pente et une orientation à chacun des glissements. Ces informations ont été obtenues avec un système d'information géographique.



Enfin, chacun des glissements a été associée à une région pluviométrique en fonction de sa localisation et ce, de manière à pouvoir associer ou non les cas de glissements de terrain avec l'avènement d'épisodes pluviométriques dans la municipalité. Par la suite, les glissements ont été jumelés aux séries de données pluviométriques en fonction de la date d'occurrence. Ceci a permis d'attribuer à chaque glissement une valeur de précipitation journalière ( $R$ ), une moyenne pluviométrique annuelle ( $MAP$ ), des valeurs de précipitations antécédentes sur 3, 5, 10, 15 et 30 jours, ainsi que des valeurs de durée ( $D$ ) et de précipitations cumulées lors de l'évènement pluviométrique ( $E$ ), le cas échéant.

### 3.3 Évaluation empirique des conditions pluviométriques liées aux glissements de terrain

#### 3.3.1 Seuils de durée de l'épisode pluviométrique ( $ED$ )

Les seuils  $ED$  ont été développés à partir de la combinaison des variables  $D$  et  $E$  obtenues pour chaque glissement ayant été déclenchés lors d'un épisode pluviométrique et sont définies respectivement comme la durée (h) et les précipitations cumulées (mm) du début de l'évènement pluviométrique jusqu'à l'occurrence du glissement. Des seuils  $ED$  ont été établis pour la municipalité d'Angra dos Reis ainsi que pour le centre urbain à partir des enregistrements journaliers et aux 15 minutes. Des seuils ont aussi été développés pour le territoire associé à chaque région pluviométrique. Ensuite, pour faciliter l'exportation de ceux-ci, des seuils normalisés ( $E_{MAPD}$ ) ont été proposés en divisant les valeurs de  $E$  par la  $MAP$  associée à la région pluviométrique pour l'année d'occurrence du glissement. Enfin, des seuils  $ED$  ont été obtenus en fonction des caractéristiques biophysiques de la région. Ainsi, des seuils ont été établis pour différents domaines lithologiques (dépôts alluviaux et fluvio-marins (DAFM), granite, orthogneiss, paragneiss), inclinaisons ( $0$  à  $10^\circ$ ,  $10$  à  $20^\circ$ ,  $20$  à  $35^\circ$ ,  $>35^\circ$ ), orientations (nord, est, sud, ouest) et occupations du sol (urbain, forêt, pâturage, dune de sable).

Dans tous les cas, les valeurs  $E$  et  $D$  ont d'abord été tracées dans un graphique à coordonnées linéaires. Une droite représentant le seuil minimum a ensuite été déterminée pour chaque graphique en adoptant une équation sous la forme suivante :

$$E = \alpha + \beta * D \quad (3)$$

où  $\alpha$  (interception) et  $\beta$  (inclinaison) sont des constantes déterminées empiriquement. L'erreur-type de ces constantes, qui correspond à l'écart-type ( $\sigma$ ) divisé par la racine carrée de la taille de l'échantillon ( $n$ )  $\left[\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right]$ , a également été calculée afin de mesurer la précision des coefficients associés à la droite.

Pour déterminer les seuils objectivement, la méthode de régression quantile (Koenker et Hallock, 2001; Koenker, 2012) a été adoptée. Plus précisément, une régression quantile au 5e percentile a été réalisée à l'aide du logiciel RStudio 0.98.1028 (RStudio, 2014) afin d'identifier la limite minimale, définie comme la plus faible valeur pluviométrique avec une confiance de 95 % sous laquelle des glissements de terrain ne sont pas déclenchés. En ce sens, nous devrions retrouver 5 % des cas sous cette limite et 95 % au-dessus. Pour effectuer la régression quantile sur les différents jeux de données, la notation suivante a été adoptée :

$$Q_{\tau}(E|D) = \inf \{y : Fy|x(y) \geq \tau\} \quad (4)$$

où  $\tau$  correspond à 0,05 (5<sup>e</sup> quantile) pour  $\epsilon \in [0, 1]$ ,  $Y$  correspond aux précipitations cumulées (mm) lors de l'évènement pluviométrique ( $E$ ) et  $X$  représente la durée ( $D$ ) des précipitations en heures.

La méthode de régression quantile a été préférée à la régression linéaire car elle s'avère une méthode statistique mieux adaptée à la présence de valeurs aberrantes (extrêmes) et d'erreurs dans les données, particulièrement dans le cadre d'une recherche où les données utilisées peuvent être inexactes et contenir des imprécisions (Saito *et al.*, 2010; Givord et D'Haultfoeuille, 2013).

### 3.3.2 Précipitations antécédentes

Afin d'évaluer l'influence possible des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain, les précipitations journalières au moment de la rupture ( $R$ ) ont été mises en relation avec les précipitations antécédentes cumulées sur 3, 5, 10, 15 et 30 jours ( $A_{(3j), (5j), (10j), (15j), (30j)}$ ) dans un graphique à coordonnées linéaires et ce, pour chaque zone d'étude considérée. Une droite ( $y = x$ ) a ensuite été tracée de manière à identifier la variable ( $R$  ou  $A_{(j)}$ )

possédant la valeur la plus élevée au moment des ruptures et ainsi déterminer si les précipitations antécédentes jouent un rôle dans l'occurrence des glissements de terrain.

### 3.4 Évaluation probabiliste des conditions pluviométriques associées aux glissements

L'intégration des événements pluviométriques n'ayant pas déclenché de glissement de terrain est nécessaire à l'établissement de seuils objectifs et reproductibles basés sur des probabilités d'occurrence. Lorsque de tels événements sont intégrés, l'incertitude peut être quantifiée et des probabilités de déclenchement peuvent être calculées pour chaque combinaison de variables pluviométriques analysées. Pour ce faire, 950 événements non-déclencheurs ont été inclus à l'échelle de la municipalité, 105 à l'échelle du centre urbain et 100 à la même échelle, mais pour la période du 19 mai 2011 au 30 juin 2013.

La régression logistique binaire a été employée pour évaluer de façon probabiliste les conditions  $E$ - $D$  et les précipitations antécédentes responsables ou non du déclenchement des glissements. Cette approche a été privilégiée à la régression linéaire multiple et à l'analyse discriminante en raison de la nature dichotomique et continue de la variable dépendante, représentée par la présence ou l'absence de glissement de terrain (Park, 2013). De plus, la régression logistique s'avère une méthode statistique robuste lorsque les données sont autocorrélées (Mathew *et al.*, 2009), ce qui est le cas pour les variables indépendantes  $E$  et  $D$  (autocorrélation qui varie entre 0,60 et 0,82 sur 1). La régression logistique a été effectuée à l'aide du logiciel XLSTAT 2014.5.02 (Addinsoft, 2014). Elle est fondée sur la fonction logistique  $f(z)$ , définie comme :

$$f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (5)$$

où  $z$  varie entre  $-\infty$  et  $\infty$  (Kleinbaum et Klein, 2010).

Pour obtenir le modèle logistique à partir de la fonction,  $z$  est écrit comme une somme linéaire d'une constante et le produit de variables indépendantes et de leurs coefficients respectifs :

$$z = \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i \quad (6)$$



où  $\alpha$  est la constante,  $X_i$  est la variable indépendante et  $\beta_i$  est le coefficient correspondant;  $i = 1 - n$  pour  $n$  variables indépendantes.

Ainsi, le modèle logistique pour le déclenchement des glissements de terrain peut être représenté par :

$$P(S = 1|X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i)}} \quad (7)$$

où  $P(S = 1|X_1, X_2, \dots, X_n)$  est la probabilité (0 à 1) qu'un glissement de terrain soit déclenché, étant donné la présence des variables indépendantes  $X_1$  à  $X_n$ .

La régression logistique est une approche de modélisation mathématique qui tente d'estimer les paramètres  $\alpha$  et  $\beta_i$  en ajustant le mieux possible les observations des variables indépendantes à partir de l'échantillon pour lequel le statut de la variable dépendante (glissement de terrain) est connu comme présent ou absent en utilisant le principe du maximum de vraisemblance (Mathew *et al.*, 2013). Le modèle est jugé satisfaisant et l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) est rejetée lorsque la valeur  $p$  est inférieure à 0,05, signifiant qu'au moins une variable indépendante incluse dans le modèle influence le déclenchement des glissements de terrain. Les variables indépendantes avec des coefficients ( $\beta$ ) statistiquement significatifs sont identifiées en utilisant le test de Wald  $[(\beta_i / \text{Erreur - type})^2]$  avec un intervalle de confiance à 95 %; chaque statistique de Wald étant comparée à un chi-carré ayant un degré de liberté. Ainsi, les variables indépendantes sont considérées influentes si leur signification ( $\text{Pr} > \text{Chi}^2$ ) est inférieure à 0,05 (Mathew *et al.*, 2009). La fiabilité du modèle logistique, soit la capacité prédictive, est ensuite évaluée à l'aide d'une table de classification croisée. Dans ce tableau, les résultats dichotomiques observés et prédits sont recoupés afin d'estimer le ratio de cas prédits correctement par le modèle (Park, 2013). Ceci dit, cette méthode ne constitue qu'une validation partielle de la capacité prédictive du modèle logistique qui limite la généralisation à d'autres sites. En effet, lorsqu'un modèle est validé en utilisant les mêmes données à partir desquelles il a été développé, il est susceptible d'être surestimé. De la sorte, le modèle devrait idéalement être validé à partir d'un jeu de données indépendant, soit à l'interne, en calibrant les paramètres du modèle avec les deux tiers des données et en validant sur le tiers restant, soit à l'externe, en calibrant sur un site et en validant sur un autre (*Ibid.*). De cette manière, si le

premier modèle s'apparente au second, le modèle logistique peut être généralisé à d'autres sites avec une certaine assurance.

Pour les seuils  $ED$ , la régression logistique a été réalisée en prenant les glissements de terrain comme variable dépendante dichotomique et la durée ( $D$ ) et les précipitations cumulées lors de l'évènement pluviométrique ( $E$ ) comme variables indépendantes. L'objectif est d'estimer les probabilités d'occurrence pour des combinaisons de  $E$  et  $D$  et quantifier l'influence de ces variables dans le déclenchement des glissements de terrain.

Pour les précipitations antécédentes, la régression logistique a été réalisée en prenant les glissements de terrain comme variable dépendante dichotomique et les précipitations antécédentes cumulées sur 3, 5, 10, 15 et 30 jours ( $A_{(j)}$ ) ainsi que les précipitations journalières au moment de la rupture ( $R$ ) comme variables indépendantes. Dans ce cas-ci, le but est d'abord d'identifier la paire de variables la plus significative dans le déclenchement des glissements de terrain, puis d'estimer les probabilités d'occurrence à partir de l'équation logistique dérivée et de quantifier l'influence des variables. Pour déterminer la paire de variables indépendantes la plus significative, le critère d'information d'Akaike (AIC) avec un intervalle de confiance à 95 % a été utilisé. Le critère AIC correspond à :

$$AIC = 2k - 2 \ln(L) \quad (8)$$

où  $k$  est le nombre de paramètres estimés et  $L$  est le maximum de vraisemblance (Akaike, 1980). Le modèle qui possède le plus petit AIC a été retenu (meilleur ajustement aux données).

Enfin, puisque le nombre d'évènements pluviométriques avec et sans glissement de terrain est inégal, cela peut engendrer une prédiction probabiliste asymétrique (Mathew *et al.*, 2013). En effet, dans la municipalité d'Angra dos Reis, les évènements non-déclencheurs représentent près de 37 % des données, alors que dans le centre urbain ce ratio est d'environ 17 % (période du 1<sup>er</sup> janvier 2008 au 31 mars 2013) et d'environ 49 % pour la période du 19 mai 2011 au 30 juin 2013. Pour pallier à cette situation, Cramer (1999) suggère d'ajuster le point de coupure, initialement établi à 50 %, en fonction du pourcentage représenté par les glissements déclenchés par les pluies. De la sorte, la régression logistique a été réalisée en utilisant un point de coupure de 0,63 à l'échelle régionale, 0,83 à l'échelle locale et de 0,49 à l'échelle locale pour la période de mai 2011 à juin 2013.

## CHAPITRE IV

### RÉSULTATS

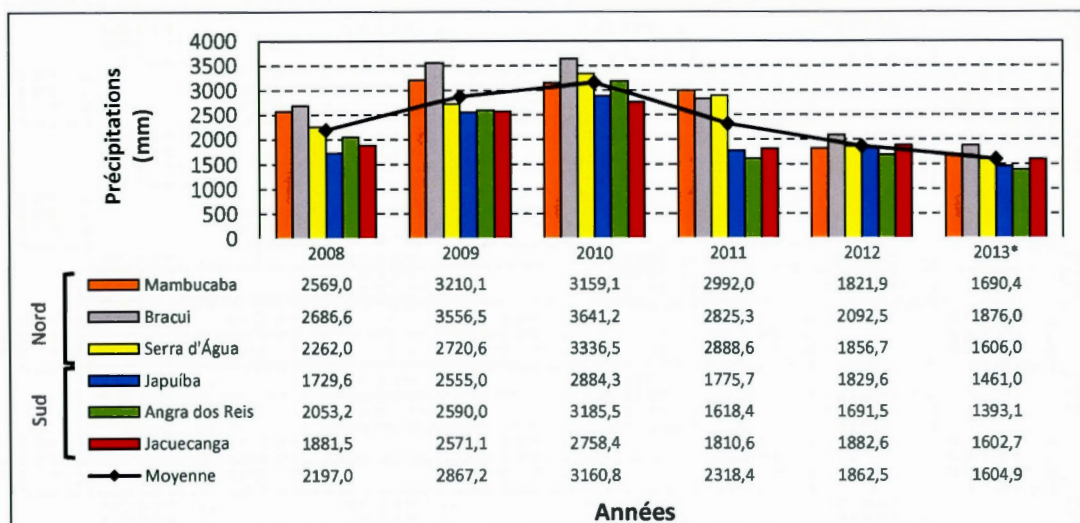
#### 4.1 Régime des précipitations et occurrence des évènements pluviométriques

Les valeurs mensuelles et annuelles (fig. 4.1; 4.2) montrent que d'importantes disparités existent entre les régions pluviométriques en termes de distribution des précipitations à l'échelle du territoire. En effet, davantage de pluie a été reçue dans le nord de la municipalité (régions *Mambucaba*, *Bracui* et *Serra D'água*) par comparaison au sud (régions *Japuíba*, *Angra dos Reis* et *Jacuecanga*) et ce, pour la majorité des mois et années analysée. Ces disparités nord-sud sont de 529 mm en moyenne annuellement, avec un minimum de 122,4 mm en 2012 et un maximum de 1167 mm en 2011. Mensuellement, l'écart minimum est 6,6 mm pour les mois de juin et l'écart maximum est de 106,3 mm lors des mois de mars, ce qui constitue un écart moyen de 48,5 mm pour l'ensemble de la période d'étude s'étendant du 1<sup>er</sup> janvier 2008 au 31 mars 2013.

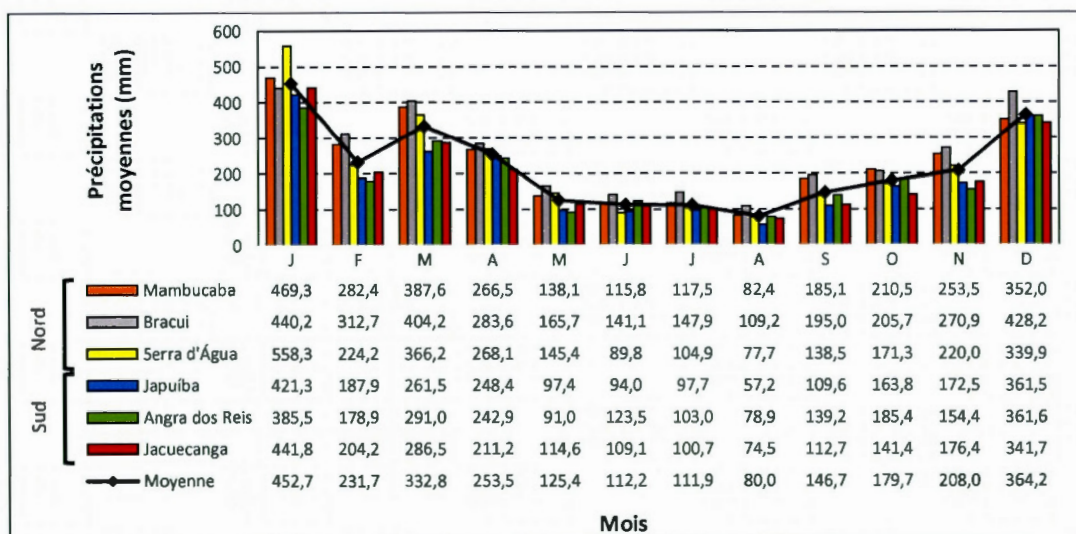
En ce qui a trait à la variabilité inter et intra-annuelles des précipitations, les valeurs mensuelles indiquent d'abord qu'il n'y a pas eu de période sans précipitations dans la municipalité d'Angra dos Reis, tous les mois cumulant plus de 75 mm de pluie. Les mois de décembre à avril ont été les plus arrosés (>208 mm), tandis que les mois de mai, juin, juillet et août ont été les plus secs (80 à 125,4 mm). À cet égard, la moyenne pluviométrique de 452,7 mm associée au mois de janvier est particulièrement élevée par comparaison aux autres mois de la saison « humide ». Plus précisément, ce sont 88,5 mm de plus qu'en décembre, qui représente le deuxième mois le plus pluvieux en moyenne, et 157,1 mm de plus que la moyenne de 295,5 mm associée à tous les autres mois *humides* (décembre, février, mars et avril). Concernant les autres mois de l'année, une transition d'une période sèche à humide a été observée, la pluviosité mensuelle augmentant graduellement du mois de septembre (146,7 mm) vers le mois de novembre (208 mm). Sur une base inter-annuelle, les années 2008 et 2011 ont enregistré des précipitations moyennes, alors que 2009 et 2010 se sont avérées très pluvieuses (>2800 mm) et que l'année



2012 a été relativement sèche par rapport à la moyenne (1862 mm). Le début de l'année 2013 a quant à lui été très pluvieux compte tenu des 1604,9 mm cumulés en seulement trois mois, ce qui est près de 600 mm au-dessus de la moyenne annuelle (1017,2 mm).

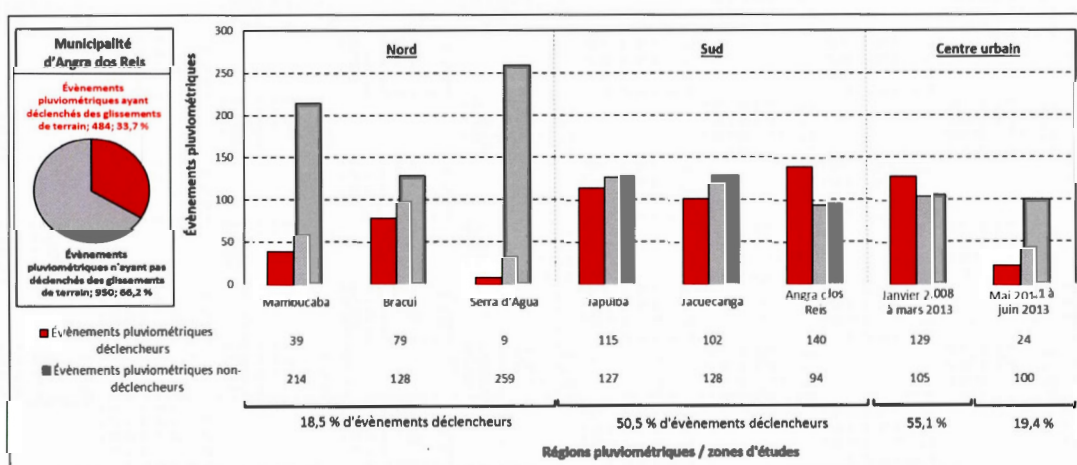


**Figure 4.1** Précipitations annuelles (mm) enregistrées par les six régions pluviométriques entre 2008 et 2013. 2013\* : les données pluviométriques correspondent uniquement aux mois de janvier, février et mars; *Moyenne* : moyenne des précipitations annuelles enregistrées par l'ensemble des six régions pluviométriques entre 2008 et 2013.



**Figure 4.2** Précipitations moyennes mensuelles (mm) enregistrées par chacune des six régions pluviométriques entre 2008 et 2013. Les données de 2013 ne couvrent que les mois de janvier, février et mars. *Moyenne* : moyenne des précipitations mensuelles enregistrées par l'ensemble des six régions pluviométriques entre 2008 et 2013 (5 ans et trois mois).

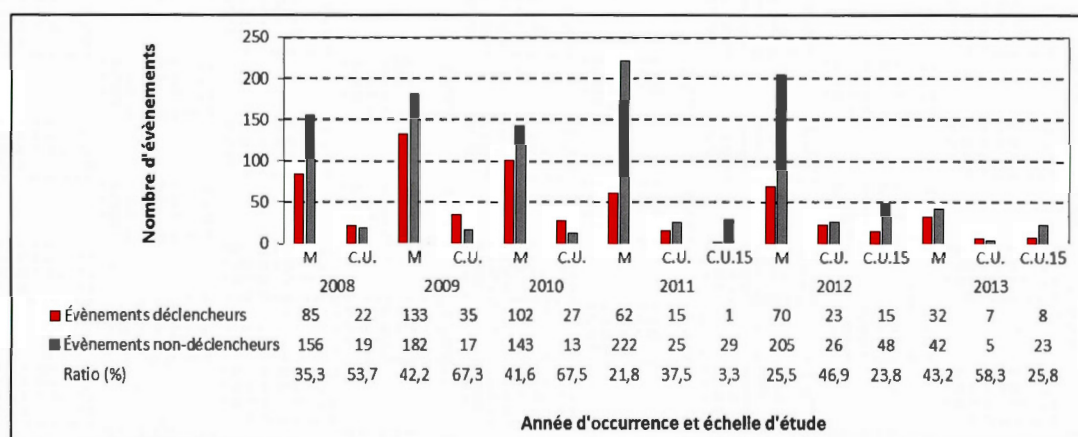
Relativement à la répartition des événements pluviométriques ayant mené ou non à l'occurrence de glissements de terrain, ce sont 1434 épisodes de plus de deux millimètres qui ont été répertoriés à l'échelle régionale de la municipalité et 234 à l'échelle locale du centre urbain (région pluviométrique *Angra dos Reis*) pour la période de janvier 2008 à mars 2013 (fig. 4.3). Pour la période du 19 mai 2011 au 30 juin 2013, également associée au centre urbain d'*Angra dos Reis*, 124 événements pluviométriques ont été dénombrés. À l'échelle de la municipalité, ce sont 33 % (484 sur 1434) des épisodes qui ont déclenché des glissements de terrain, comparativement à 55 % dans le centre urbain pour la période 2008-2013 (enregistrements journaliers) et 19 % à la même échelle pour la période 2011-2013 (enregistrements aux 15 minutes). Lorsqu'analysée en fonction de la région pluviométrique, une disparité nord-sud, semblable à celle observée au niveau de la pluviosité annuelle et mensuelle, est distinguable. Effectivement, si le nombre moyen d'événements recensé par les régions pluviométriques est similaire au nord (242,6) et au sud (235,3) de la municipalité, il demeure que le pourcentage d'épisodes ayant mené au déclenchement de glissements est significativement plus élevé au sud. À cet égard, un événement sur deux (50,5 %) a déclenché des glissements de terrain dans la partie méridionale par comparaison à un sur cinq (18,9 %) dans la partie septentrionale.



**Figure 4.3** Répartition des événements pluviométriques ayant déclenché ou non des glissements de terrain dans la municipalité d'*Angra dos Reis*, en fonction de la région pluviométrique, et dans le centre urbain selon la période d'étude (janvier 2008 à mars 2013 et mai 2011 à juin 2013).

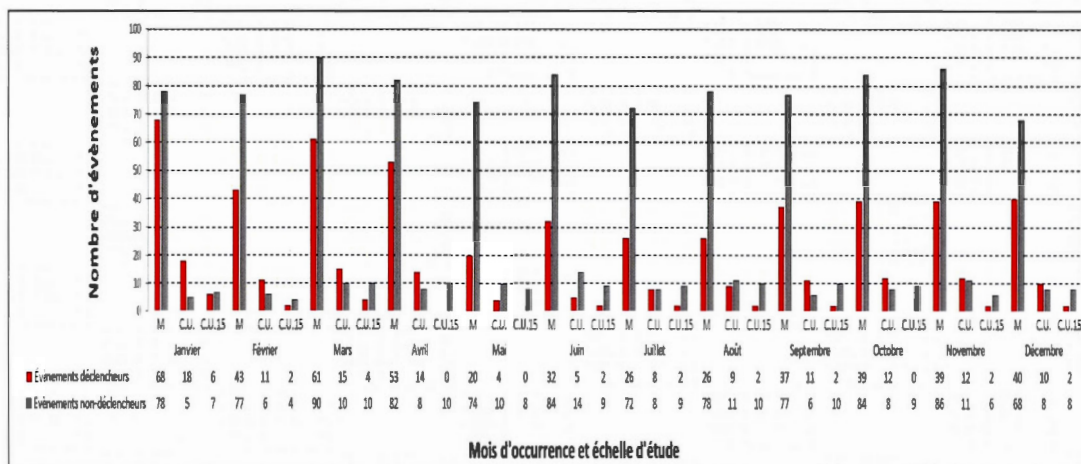


À propos de la variabilité inter- et intra-annuelle des événements déclencheurs et non-déclencheurs, les valeurs annuelles indiquent d'abord que des événements déclencheurs sont survenus à tous les ans et à toutes les échelles d'analyse (fig. 4.4). En lien avec les valeurs pluviales, ce sont les années 2009 et 2010 qui ont répertorié le plus d'épisodes déclencheurs, suivies des années 2008, 2011 et 2012. Pour l'année 2013, le nombre d'événements déclencheurs se situe dans la moyenne tant à l'échelle locale (7 cas) que régionale (32 cas) et ce, pour trois mois de données. En effet, le nombre moyen d'événements ayant déclenché des glissements de terrain durant les mois de janvier, février et mars est de 29 à l'échelle régionale de la municipalité et de 7 à l'échelle locale du centre urbain. Concernant les épisodes non-déclencheurs, ils ont été plus nombreux lors des années 2011 et 2012 et plus ou moins semblables lors des années 2008, 2009 et 2010 et ce, à toutes les échelles. Sur une base intra-annuelle (fig. 4.5), le nombre moyen d'événements déclencheurs et les ratios d'événements déclencheurs versus non-déclencheurs varient essentiellement en fonction de la saison d'occurrence. À l'échelle régionale, le nombre moyen d'événements déclencheurs et les ratios sont de 9,4 et 39,8 % en saison *humide* (janvier à avril), de 5,2 et 25 % en saison *sèche* (mai à août) et de 7,6 et 31,7 % lors de la saison de transition (septembre à novembre), alors qu'à l'échelle locale, les valeurs sont respectivement de 2,4 et 64,4 %, de 1,3 et 37,4 %, et de 2,3 et 58,9 % pour la période 2008-2013 et de 0,5 et 25,6 %, de 0,3 et 13,2 %, et de 0,26 et 13,8 % pour la période 2011-2013.



**Figure 4.4** Variabilité annuelle des événements pluviométriques déclencheurs et non-déclencheurs dans la municipalité d'Angra dos Reis (M), le centre urbain (C.U.) et le centre urbain pour la période du 18 mai 2011 au 30 juin 2013 (C.U.15). L'année d'occurrence correspond à la date finale de l'événement pluviométrique.





**Figure 4.5** Variabilité mensuelle des évènements pluviométriques déclencheurs et non-déclencheurs dans la municipalité d'Angra dos Reis (M), le centre urbain (C.U.) et le centre urbain pour la période du 18 mai 2011 au 30 juin 2013 (C.U.15). Le mois d'occurrence correspond à la date finale de l'évènement pluviométrique.

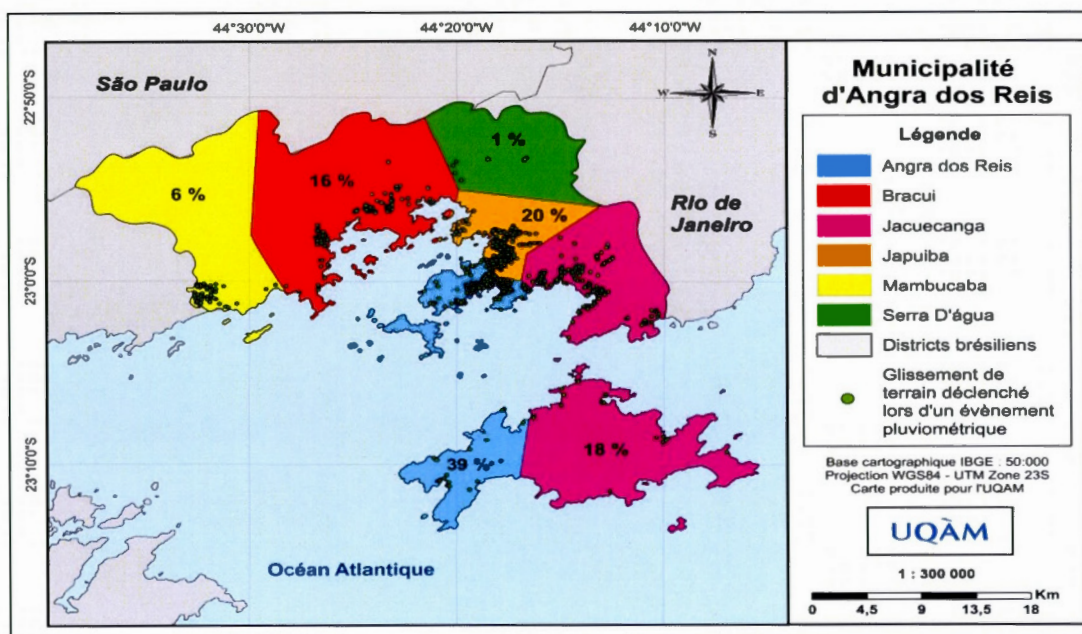
#### 4.2 Fréquence et occurrence des glissements de terrain

L'ensemble des 3006 glissements de terrain valables dans la base de données a été associé ou non à l'avènement d'épisodes pluviométriques dans les différentes régions pluviométriques de la municipalité d'Angra dos Reis entre 2008 et 2013 afin de préparer les analyses par seuils pluviométriques. À l'échelle régionale, ce sont 1640 glissements (54,5 %) qui ont été jumelés à l'un des 1434 évènements répertoriés entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. Pour la même période d'étude, mais à l'échelle du centre urbain, 526 glissements ont été liés à un des 234 épisodes pluviométriques (à partir d'enregistrements journaliers). Finalement, 98 glissements ont été identifiés comme ayant été déclenchés par l'un des 124 évènements pluviométriques survenus dans le centre urbain entre le 18 mai 2011 et le 30 juin 2013 (à partir d'enregistrements aux 15 minutes).

##### 4.2.1 À l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis

La majorité des 1640 glissements (77 %) sont survenus au sud de la région dans l'aire d'influence des stations *Angra dos Reis*, *Japuiba* et *Jacuecanga*, où se concentre la majorité de la population et des zones urbaines (fig. 4.3). En contrepartie, peu de glissements ont été

répertoriés au nord, particulièrement dans l'aire d'influence du pluviomètre *Serra D'água* (1 %) et dans les zones végétalisées du Plateau Bocaína.



**Figure 4.6** Répartition spatiale (%) des 1640 glissements de terrain déclenchés par les pluies dans la municipalité d'Angra dos Reis entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 (Fond : IBGE, 2014).

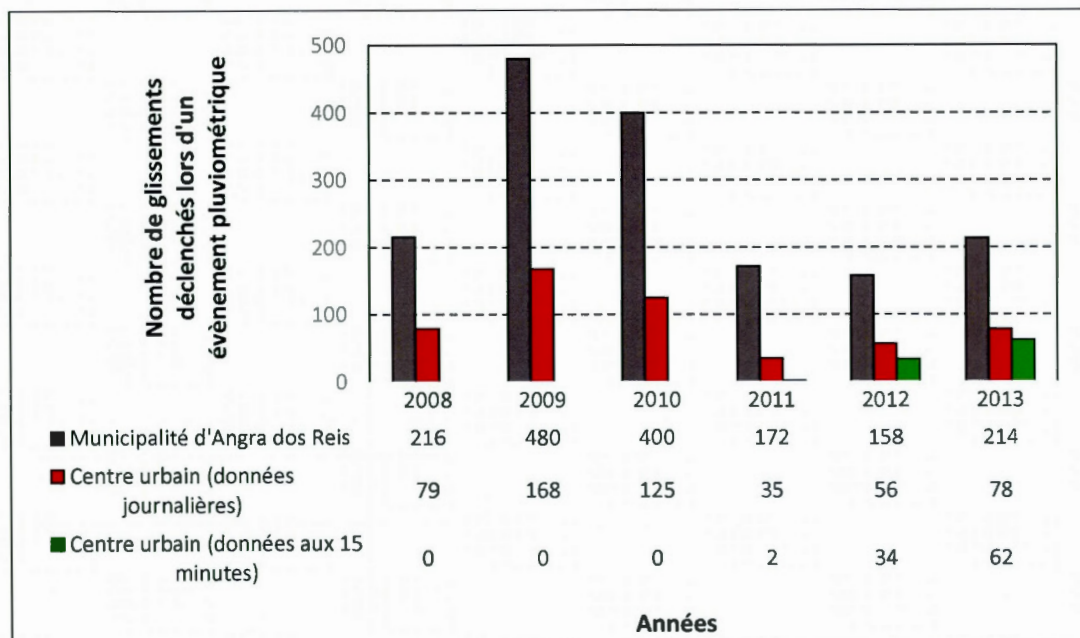
Ces glissements de terrain se sont produits lors de 484 événements pluviométriques, correspondant à 33,7 % de tous les événements pluviométriques recensés (1434) par les différents pluviomètres entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 (fig. 4.3). Ces 484 événements ayant mené au déclenchement de glissements ont duré approximativement 5 jours (128 heures), avec une durée minimale et maximale de 24 et 624 heures (26 jours), et ont initié 3,3 glissements en moyenne. Plus précisément, 45,2 % (219 sur 484) des événements déclencheurs ont initié un seul glissement, 75,4 % (365 sur 484) ont déclenché trois glissements ou moins et seulement 7,6 % (37 sur 484) ont généré dix ruptures ou plus, avec un maximum de 38 glissements par épisode. À cet égard, deux événements pluviométriques recensés dans la région *Angra dos Reis* ont déclenché exactement 38 glissements de terrain. Le premier a débuté le 27 décembre 2012 et s'est terminé le 4 janvier 2013, cumulant 540,5 mm de pluie en 9 jours, alors que le second s'est amorcé le 9 janvier 2013 et s'est conclu le 22 janvier 2013 après avoir déversé 372,9 mm en 14 jours. Si le premier des deux événements pluviométriques n'avait



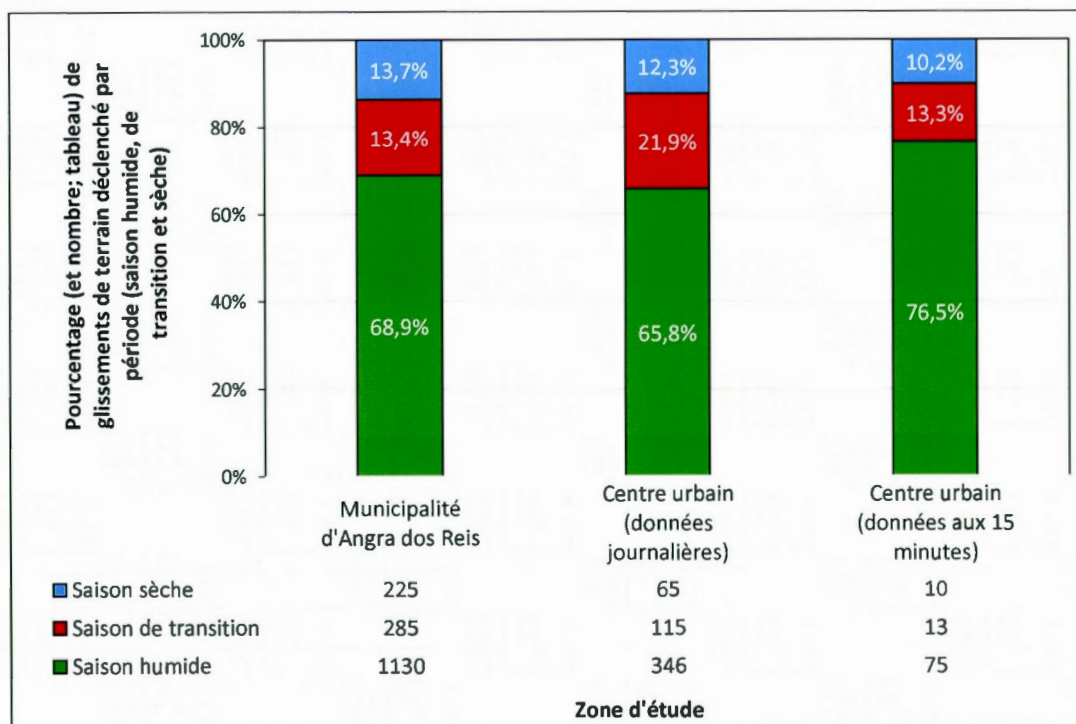
cumulé que 46,5 mm dans les 30 jours précédant, le second avait toutefois cumulé 565 mm de précipitations antécédentes sur 30 jours. Par conséquent, les sols de la région avaient reçu 937,9 mm en 44 jours en date du 22 janvier 2013. Par le fait même, c'est dans la région pluviométrique *Angra dos Reis* que se sont produits le plus de glissements de terrain durant la période d'étude, soit 38,9 % (638 sur 1640) de tous les glissements déclenchés lors d'événements pluviométriques. Ceci correspond à une moyenne de 4,4 glissements par épisode pluviométrique déclencheur, ce qui est légèrement supérieur à la moyenne régionale de 3,3.

En ce qui a trait à la fréquence inter-annuelle des glissements de terrain, ce sont les années 2009 et 2010 qui ont été les plus significatives avec 880 glissements de terrain (53,65 %), alors que 2008, 2011 et 2012 ont été moins mouvementés avec seulement 546 glissements (33,2 %) en trois ans (fig. 4.7). En d'autres mots, 2,5 fois plus de glissements se sont produits lors des années 2009 et 2010 par comparaison aux années 2008, 2011 et 2012 à l'échelle régionale de la municipalité. Par ailleurs, le début de l'année 2013 s'est aussi avéré très dynamique avec 214 cas dénombrés en seulement trois mois, ce qui surpasse les totaux de 2011 et 2012 et équivaut au total de 2008. Sur une base saisonnière (fig. 4.8), 68,9 % des glissements (1130 sur 1640) ont été initiés lors de la saison *humide* (68,9 %). Ceci surpasse significativement la quantité de glissements ayant été déclenchés lors de la saison *sèche* et la saison de transition, qui ont tous les deux accaparé environ 13-14 % de tous les glissements initiés entre 2008 et 2013. Sur une base mensuelle (fig. 4.9), les mois de janvier sont ceux où le plus de glissements ont généralement été déclenchés, suivit des mois de mars, avril et décembre. Cette moyenne de 69 glissements par mois en janvier correspond pratiquement au double de la quantité recensée durant les autres mois *humides* (décembre, février, mars et avril), dont la moyenne est de 33, et cinq fois plus que lors des mois légèrement plus secs (mai à octobre), dont la moyenne est de 13. À cet égard, le mois de janvier 2013 a été particulièrement probant avec 193 glissements. Cette forte activité géomorphologique est liée à des précipitations 2,25 fois plus importantes que la moyenne (452,7 mm), alors que près de 1018 mm de pluie ont été enregistrés en 24 jours de précipitation. Enfin, le mois de mai représente la période la moins dynamique au niveau de l'occurrence de glissements avec seulement six glissements répertoriés en moyenne. Cette donnée demeure néanmoins significative et indique que des glissements peuvent survenir à n'importe quel mois de l'année et ce, malgré des précipitations moins importantes à l'hiver (mai à août).

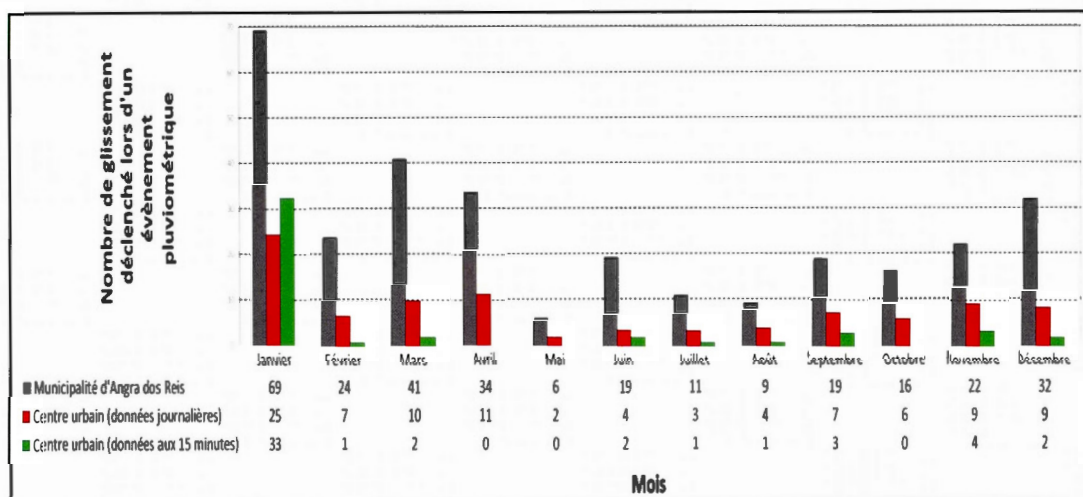




**Figure 4.7** Variabilité annuelle des glissements initiés par les pluies dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (données journalières et aux 15 minutes).



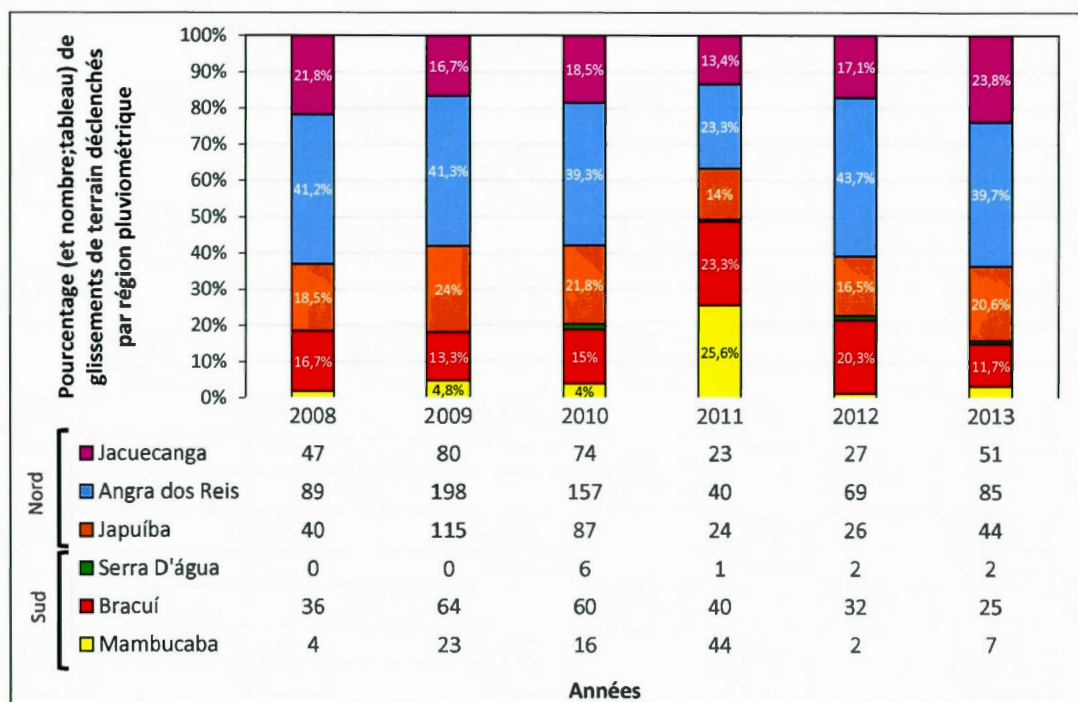
**Figure 4.8** Variabilité saisonnière (nombre et pourcentage) des glissements déclenchés lors d'événements pluviométriques dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis (données journalières et aux 15 minutes).



**Figure 4.9** Variabilité mensuelle des glissements de terrain déclenchés par les pluies dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (données journalières et aux 15 minutes).

En ce qui concerne la répartition inter-annuelle des glissements de terrain à l'échelle régionale de la municipalité, les régions pluviométriques situées au sud de la municipalité (Japuíba, Angra dos Reis et Jacuecanga) ont été systématiquement affectées par un plus grand nombre de glissements, soit un peu plus du trois quarts de tous les glissements recensés entre 2008 et 2013 (fig. 4.10). Seule l'année 2011 se distingue avec une répartition plus uniforme des glissements à l'échelle de la région. De manière générale, c'est la région pluviométrique *Angra dos Reis* qui a été la plus affectée par les glissements de terrain, avec environ 38 % de tous les cas recensés à l'échelle de la municipalité entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. Sur une base saisonnière, un bilan équivalent peut être dressé alors que les régions méridionales ont été constamment plus touchées par les glissements que les régions situées au nord (78 % des cas) et ce, tant lors de la saison *humide* que lors de la saison *sèche* ou de transition.

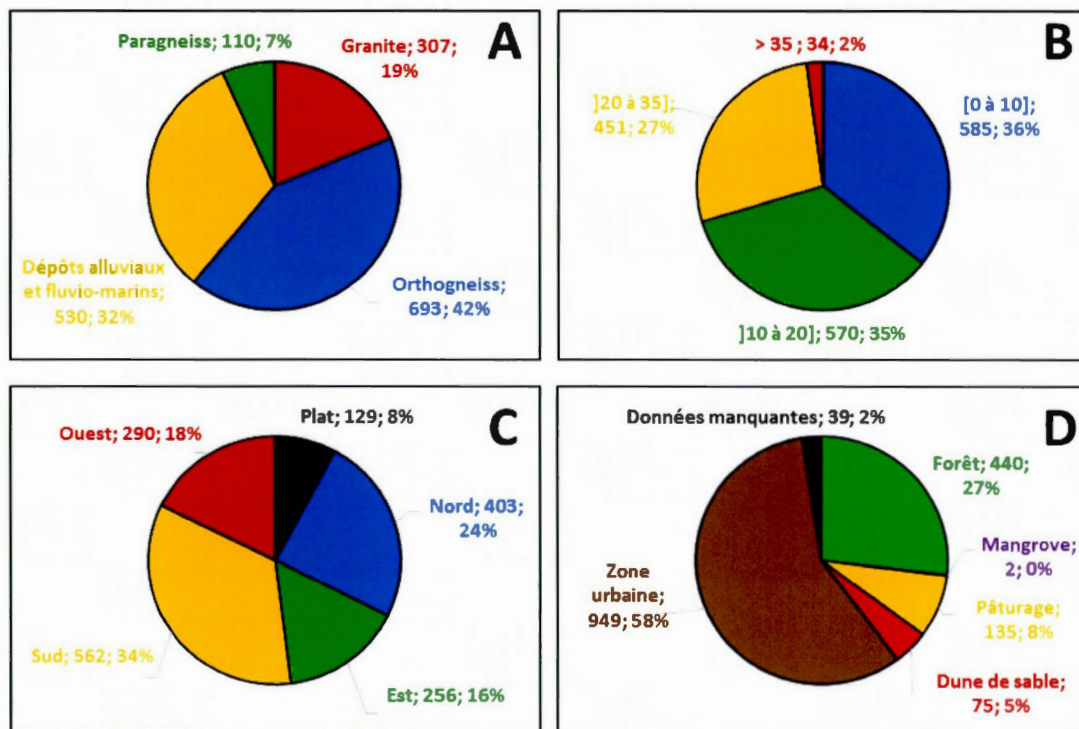
Enfin, le couplage avec les données biophysiques (fig. 4.11) de la région montre que les glissements de terrain initiés par les pluies sont survenus en majeure partie dans les orthogneiss (42 %) et les dépôts alluviaux et fluvio-marins (32 %) et, dans une moindre mesure, dans les granites (19 %) et les paragneiss (7 %) (fig. 4.11a). De manière plus approfondie, seulement un glissement survenu dans les orthogneiss a été déclenché au nord de la municipalité, tous les cas s'étant produits dans les paragneiss proviennent de la région pluviométrique *Bracuí*, des



**Figure 4.10** Répartition (nombre et pourcentage) inter-annuelle (2008 à 2013) des glissements de terrain déclenchés lors d'événements pluviométriques dans les six régions pluviométriques de la municipalité d'Angra dos Reis (Mambucaba, Bracuí, Serra D'água, Japuiba, Angra dos Reis et Jacuecanga).

307 glissements survenus dans les granites, seulement neuf sont associés aux régions pluviométriques du nord-est de la municipalité (Bracuí, Serra D'água et Japuiba), et enfin, malgré une répartition relativement uniforme des glissements dans les *DAFM*, seulement 5 cas proviennent de la région pluviométrique *Angra dos Reis*. En ce qui a trait à l'inclinaison des pentes, 71 % des cas se sont produits sur des pentes faiblement inclinées (0 à 20°), 27 % sur des versants inclinés entre 20 et 35° et seulement 2 % sur des pentes fortement inclinées (>35°) (fig. 4.11b). À propos de l'orientation des pentes, près du tiers des glissements (34 %) ont été déclenchés sur des versants orientés au sud (fig. 4.11c), soit face aux vents dominants, alors que 24 % ont été initiés sur des pentes exposées au nord. Les autres cas recensés étant associés à des pentes orientées vers l'ouest (18 %) et l'est (16 %) et en terrain relativement plat (8 %). Enfin, 58 % des glissements ont été déclenchés en milieu urbain par comparaison à 27 % en milieu forestier et 8 % au sein de pâturages (fig. 4.11d). Pour ces trois derniers paramètres biophysiques, il n'existe pas de tendance claire en ce qui a trait à la distribution géographique des glissements de terrain à l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis.

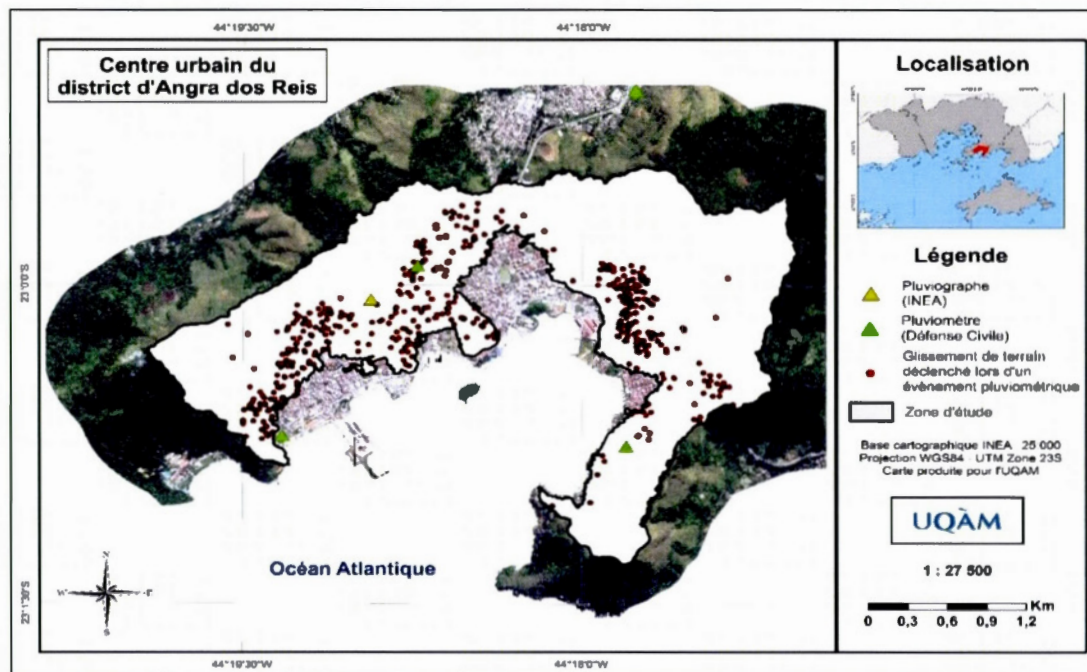




**Figure 4.11** Répartition (%) des glissements de terrain ayant été déclenchés lors d'évènements pluviométriques dans la municipalité d'Angra dos Reis entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 en fonction des données biophysiques. *Légende* : (A) Lithologie; (B) Angle de pente (degrés); (C) Orientation de la pente; (D) Occupation du sol.

#### 4.2.2 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements journaliers

À l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis, la distribution géographique des glissements de terrain est relativement hétérogène malgré un regroupement assez important (155 cas; 29,5 %) dans les colluvions des quartiers *Sapinhatuba I* et *Monte Castelo* au centre-est de la zone d'étude (fig. 4.12). Ils ont été amorcés lors de 131 des 234 (55,98 %) évènements pluviométriques identifiés dans les enregistrements du pluviomètre *Angra dos Reis*. Ces 131 épisodes déclencheurs ont duré un peu plus de 5 jours, soit 123 heures, avec une durée minimale et maximale de 24 et 576 heures (24 jours). Le nombre de ruptures initié par ces épisodes varie de 1 à 38, pour une moyenne de 4,1 glissements par évènement pluviométrique déclencheur. Plus spécifiquement, 35,8 % (47 sur 131) des évènements déclencheurs ont initié un seul glissement, 63,3 % (83 sur 131) ont déclenché trois glissements ou moins et seulement 9,1 % (12 sur 131) ont généré dix ruptures ou plus.

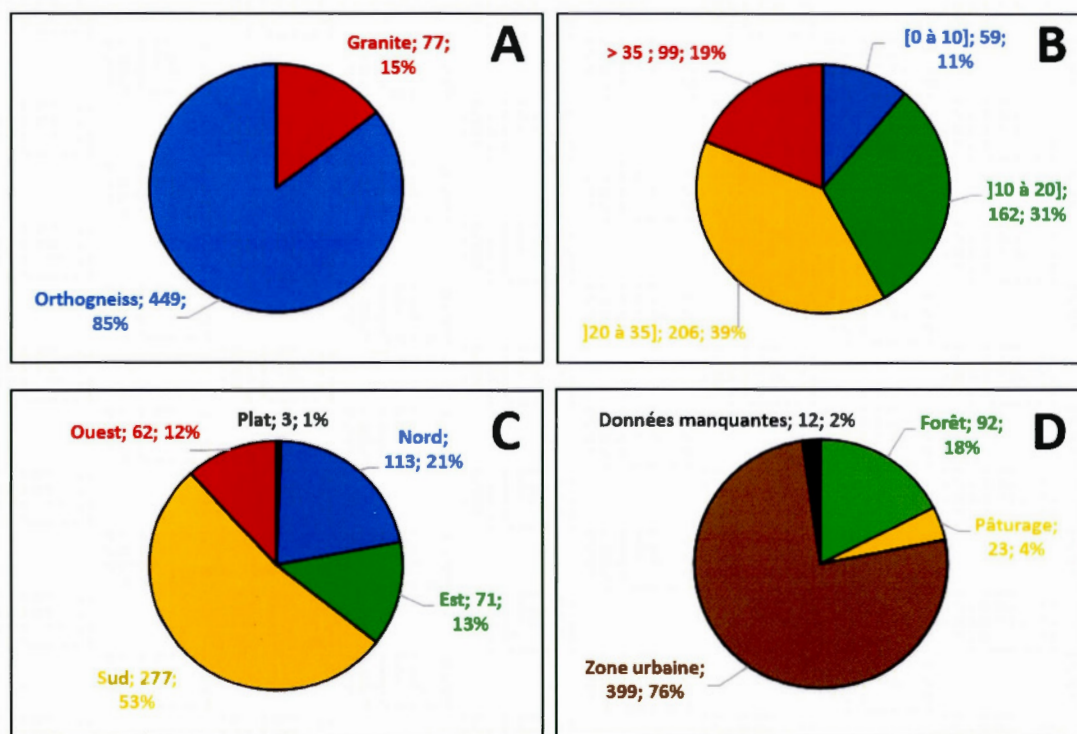


**Figure 4.12** Localisation des 526 glissements de terrain déclenchés lors d'un épisode pluviométrique dans le centre urbain d'Angra dos Reis entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).

Au sujet de la fréquence inter-annuelle des glissements de terrain, ce sont les années 2009 et 2010 qui ont été les plus mouvementées avec 293 glissements (55,7 %), suivit des années 2008, 2012 puis 2011 (fig. 4.7). En d'autres mots, ce sont environ 2,5 fois plus de glissements qui ont été répertoriés durant les années 2009 et 2010 par rapport aux années 2008, 2011 et 2012. De plus, tout comme à l'échelle régionale, l'activité géomorphologique a été particulièrement intense au début de l'année 2013 avec 78 glissements en seulement trois mois, ce qui surpasse les totaux annuels de 2011 (35 cas) et 2012 (56 cas). Sur une base saisonnière (fig. 4.8), deux tiers des 526 glissements (65,8 %) répertoriés à l'échelle locale du centre urbain ont été initiés lors de la saison *humide*. Une diminution graduelle et significative a ensuite été observée lors des deux saisons suivantes avec 21,9 % des cas initiés lors de la saison de transition et 12,3 % lors de la saison *sèche*. Sur une base mensuelle (fig. 4.9), le mois de janvier a été le plus dynamique avec une moyenne de 25 glissements par comparaison à seulement sept pour l'ensemble des autres mois.



En ce qui concerne les caractéristiques géologiques, topographiques et d'occupation du sol associées à ces 526 glissements de terrain, elles indiquent que 85 % des glissements sont survenus dans les orthogneiss et 15 % dans les granites (fig. 4.13a). 42 % des glissements sont survenus sur des pentes faiblement inclinées (0 à 20°), 39 % sur des pentes entre 20 et 35° et 19 % sur des pentes raides >35° (fig. 4.13b). À cet égard, 64 glissements de plus ont été recensés sur des pentes raides à l'échelle locale par comparaison à l'échelle régionale. Quant à l'orientation des versants, ce sont ceux orientés au sud qui ont été les plus affectés avec 53 % des glissements (fig. 4.13c), par comparaison à 21 % sur les pentes exposées au nord, 13 % à l'est et 14 % à l'ouest. Enfin, une forte proportion des cas (76 %) est survenue en milieu urbain, alors que seulement 18 % se sont produits en zone de forêt et 4 % en zone de pâturage (fig. 4.13d). D'ailleurs, les glissements provenant des zones de pâturages sont exclusivement localisés à l'est du centre urbain, dans les quartiers *Monte Castelo* et *Marinas*.

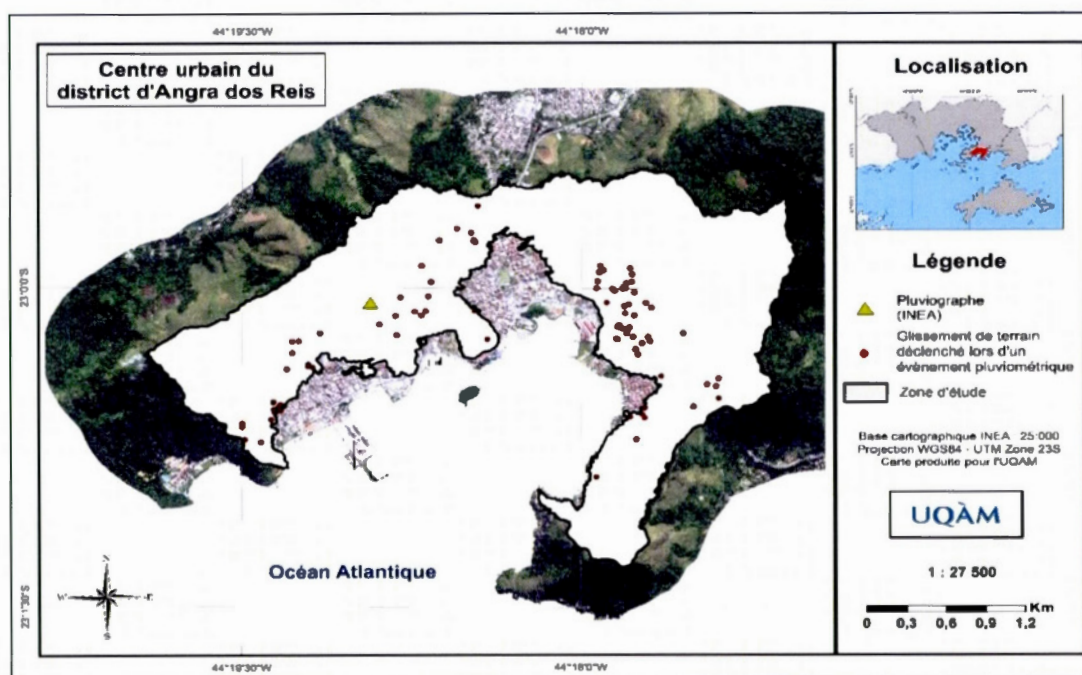


**Figure 4.13** Répartition (%) des 526 glissements de terrain ayant été déclenchés lors d'événements pluviométriques dans le centre urbain d'Angra dos Reis entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 en fonction des données biophysiques. *Légende* : (A) Lithologie; (B) Angle de pente (degrés); (C) Orientation de la pente; (D) Occupation du sol.



#### 4.2.3 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements aux 15 minutes

Des 3006 glissements de terrain présents dans le registre, 98 ont été déclenchés dans le centre urbain d'Angra dos Reis entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013. Ils sont relativement bien distribués à l'échelle de la zone d'étude avec un léger regroupement dans la portion des colluvions des quartiers *Sapinhatuba I* et *Monte Castelo* (fig. 4.14). Ces 98 glissements ont été déclenchés lors de 24 des 124 événements pluviométriques (19,3 %) identifiés dans les enregistrements aux 15 minutes du pluviographe *Angra* géré par l'INEA. Ces 24 événements ont duré approximativement quatre jours (96 heures), avec une durée minimale et maximale de 27,5 et 276,25 heures (11 jours et demi). Le nombre de ruptures initié par ces épisodes varie de un à 33, pour une moyenne de quatre glissements par événement pluviométrique déclencheur. Plus spécifiquement, 41,6 % (10 sur 24) des événements déclencheurs ont initié un seul glissement, 75 % (18 sur 24) ont déclenché trois glissements ou moins et seulement deux épisodes sur 24 (8,3 %) ont généré dix ruptures ou plus.



**Figure 4.14** Localisation des 98 glissements de terrain déclenchés par les pluies dans le centre urbain d'Angra dos Reis entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 à des fins d'analyse locale (Fond : INEA, 2013).

Au niveau de la fréquence d'occurrence des glissements (fig. 4.7), 62 (63,2 %) ont été initiés entre janvier et juin 2013, ce qui représente plus de cas que lors de la période de 19 mois associée aux années 2011 et 2012. D'un point de vue saisonnier (fig. 4.8), la majorité des glissements se sont produits durant la saison humide (75 cas) par comparaison à la saison *sèche* et de transition qui ont recensé respectivement 10 et 13 glissements. Finalement, ce sont les mois de janvier qui ont été le plus affectés par les glissements de terrain avec une moyenne de 33 cas. Ceci correspond à une moyenne 8,25 fois plus élevée que pour novembre, qui représente le deuxième mois le plus dynamique lors de la période analysée. À cet égard, le mois de janvier 2013 a été particulièrement mouvementé avec 58 glissements de terrain, soit 59 % des tous les glissements répertoriés à l'échelle du centre urbain durant la période s'étalant du 18 mai 2011 au 30 juin 2013.

### 4.3 Seuils pluviométriques de déclenchement des glissements de terrain

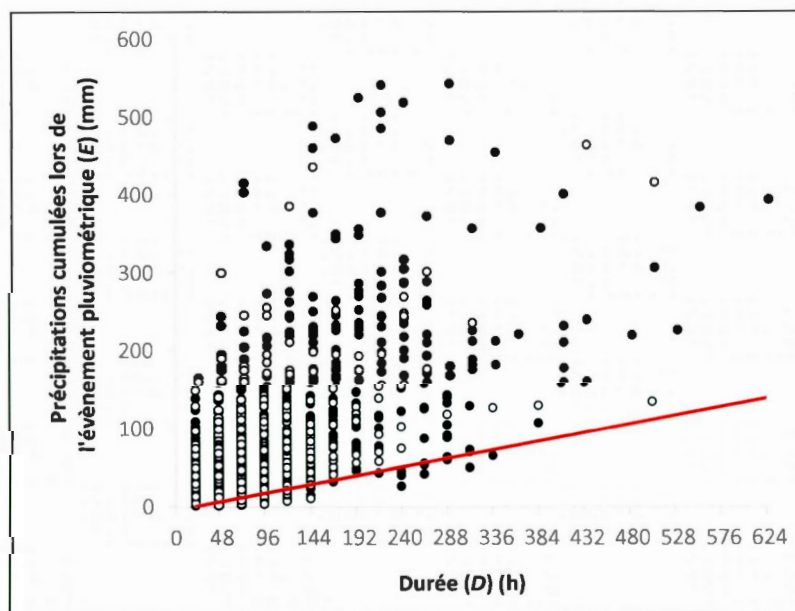
#### 4.3.1 Seuils de durée de l'épisode pluviométrique (*ED*)

##### 4.3.1.1 À l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis

Les 1640 glissements de terrain répertoriés ont été déclenchés lors d'événements pluviométriques cumulant entre deux et 542,9 mm, avec une moyenne de 111,9 mm et une forte concentration de cas (89 %) sous les 250 mm (fig. 4.15). La durée des épisodes déclencheurs varie entre 24 et 624 heures (26 jours) avec une moyenne de 101 heures et une forte proportion (89 %) sous les 216 heures. Par ailleurs, une forte proportion de glissements (89 %) ont été déclenchés par des événements d'une durée inférieure à 216 heures et cumulant moins de 250 mm. Le seuil minimum, défini comme la plus faible valeur pluviométrique au-dessous de laquelle des glissements de terrain ne sont pas déclenchés est représenté par une droite ascendante dont l'équation correspond à  $E = 0.23125 * D - 4.2$  et le coefficient de détermination à 0,167. Ainsi, des ruptures sont attendues lors de précipitations surpassant 1,35 mm en 24 heures, 6,9 mm en 48 heures, 18 mm en 96 heures, 23,55 mm en 120 heures et 140,1 mm en 624 heures. Les erreurs-types associées à l'estimation de l'interception  $\alpha$  et de la pente  $\beta$  sont de 0,065 et de 0,001 (tabl. 4.1).

**Tableau 4.1**  
Seuils  $ED$  pour la possible occurrence de glissements de terrain  
dans la municipalité d'Angra dos Reis

#	Échelle d'analyse	Nombre de glissements	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Erreur-type
1	Municipalité d'Angra dos Reis	1640	$E = -4.2 + 0.23125 * D$	$24 < D < 624$	$\alpha = 0.065,$ $\beta = 0.001$
2	Centre urbain (enregistrements journaliers)	526	$E = -5.1933 + 0.2269 * D$	$24 < D < 528$	$\alpha = 2.66,$ $\beta = 0.02$
3	Centre urbain (enregistrements aux 15 minutes)	98	$E = -11.181 + 0.5104 * D$	$0.25 < D < 216$	$\alpha = 2.82,$ $\beta = 0.003$

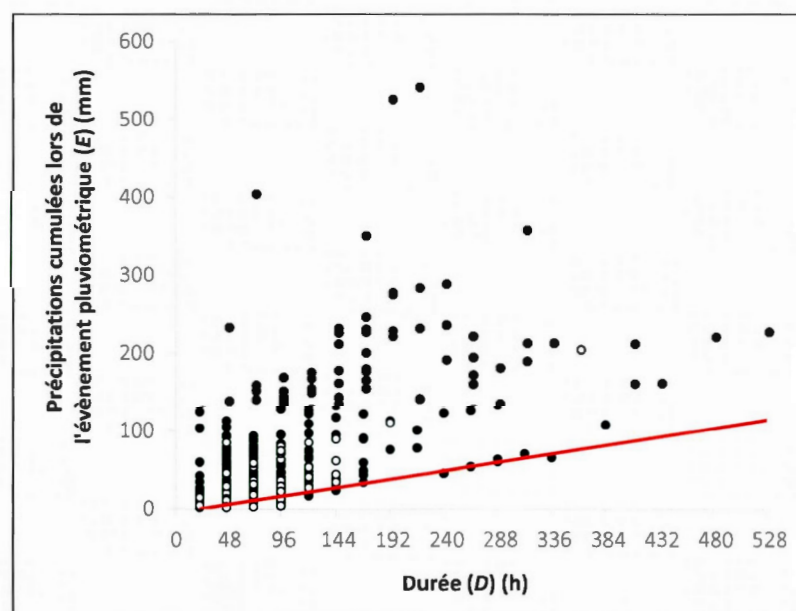


**Figure 4.15** Seuil  $ED$  minimum (5 %) établi pour la municipalité d'Angra dos Reis à partir de 1640 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. *Cercles blancs* : événements pluviométriques n'ayant pas déclenché de glissement de terrain (950 cas); utilisés à des fins d'analyse probabiliste.



#### 4.3.1.2 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements journaliers

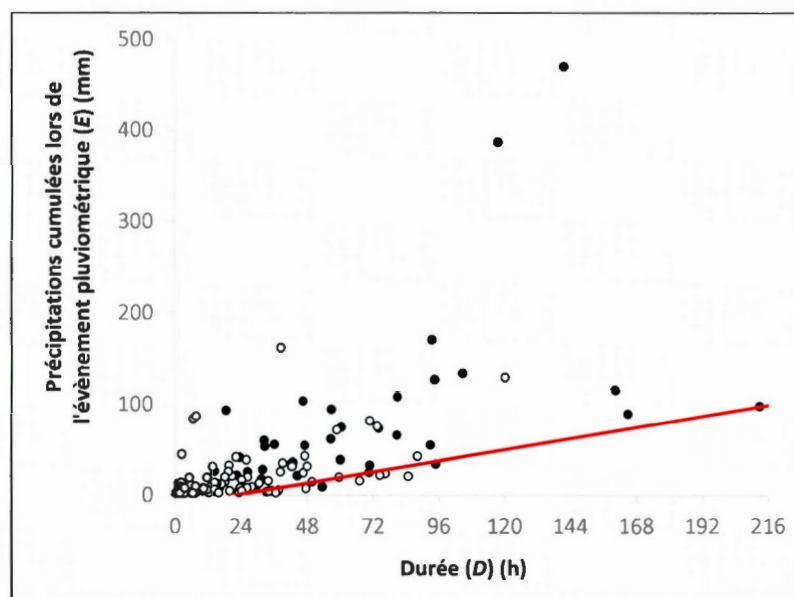
Les 526 glissements de terrain inventoriés à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis ont été déclenchés lors d'événements pluviométriques cumulant entre deux et 540,45 mm, avec une moyenne de 114,89 mm et une forte concentration (90 %) des glissements initiés avec moins de 250 mm (fig. 4.16). La durée des épisodes déclencheurs varie entre 24 et 528 heures (22 jours) avec une moyenne d'environ 108 heures et une forte proportion (92 %) sous les 216 heures. Le seuil minimum est représenté par une droite ascendante dont l'équation est  $E = 0.2269 * D - 5.1933$  et le coefficient de détermination à 0,182. Ce seuil indique que des ruptures sont attendues lors de précipitations surpassant 0,25 mm en 24 heures, 5,7 mm en 48 heures, 16,59 mm en 96 heures, 22,04 mm en 120 heures et 114,63 mm en 624 heures. Les erreurs-types associées à l'estimation des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont de 2,66 et de 0,02 (tabl. 4.1).



**Figure 4.16** Seuil  $ED$  minimum (5 %) établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 526 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. *Cercles blancs* : événements pluviométriques n'ayant pas déclenché de glissement de terrain (105 cas); utilisés à des fins d'analyse probabiliste.

#### 4.3.1.3 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements aux 15 minutes

Les 98 glissements de terrain catalogués à l'échelle du centre urbain, durant la période s'étalant du 19 mai 2011 au 30 juin 2013, ont permis d'établir un seuil pluviométrique minimum dont l'équation est  $E = 0.5104 \cdot D - 11.181$  ( $R^2 = 0,206$ ) (fig. 4.17). Ces glissements ont été initiés lors d'épisodes pluviométriques d'une durée variant entre 2,5 et 212,75 heures et totalisant entre 2,2 et 469,6 mm, avec une moyenne d'environ 83 heures et 181,31 mm. Il est pertinent de mentionner que 32 glissements (32,6 %) ont été déclenchés par des précipitations événementielles de 386,6 et 469,6 mm, alors que les 66 autres glissements se sont produits lors de précipitations inférieures à 170,2 mm. Cet écart de plus de 216 mm est lié à un événement pluviométrique ayant délaissé 469,6 mm de pluie et déclenché 33 glissements entre le 30 décembre 2012 et le 4 janvier 2013 (144 heures). La droite ascendante indique que des mouvements de masse sont attendus lors de précipitations surpassant 1,06 mm en 24 heures, 13,31 mm en 48 heures, 50,06 mm en 120 heures et 99,05 mm en 216 heures (9 jours). Les erreurs-types associées à l'estimation des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont de 0,282 et de 0,003 (tabl. 4.1).



**Figure 4.17** Seuil  $ED$  minimum (5 %) établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 98 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013. Cercles blancs : événements pluviométriques n'ayant pas déclenché de glissement de terrain (100 cas); utilisés à des fins d'analyse probabiliste.

#### 4.3.1.4 Seuils par régions pluviométriques

De manière à évaluer plus précisément la variabilité des valeurs pluviométriques seuils à l'échelle régionale de la municipalité, des seuils minimums ont été développés pour chacune des six régions pluviométriques. Au total, ce sont 1640 glissements de terrain qui ont été utilisés pour établir les seuils, soit 96 pour la région *Mambucaba*, 257 pour *Bracuí*, 11 pour *Serra D'água*, 336 pour *Japuiba*, 636 pour *Angra dos Reis* et 302 pour *Jacuecanga* (tabl. 4.2). Lorsque comparé graphiquement (fig. 4.18), on remarque que ce sont les régions *Serra D'água* et *Mambucaba* qui ont besoin de plus de précipitations pour déclencher des glissements de terrain comme le montre les équations suivantes :  $E = -5.0 + 0.625*D$  ( $R^2 = 0,331$ ) et  $E = -24.885 + 0.647*D$  ( $R^2 = 0,287$ ). Ceci correspond à recevoir entre 0 et 10 mm en 24 heures, entre 6,2 et 25 mm en 48 heures, entre 37,2 et 55 mm en 96 heures, entre 52,8 et 70 mm en 120 heures et entre 146 et 160 mm en 264 heures (11 jours), les valeurs les plus élevées correspondant à la région *Serra D'água*. Ces glissements ont toutefois été déclenchés plus rapidement (<96 h) que ceux dans le secteur *Mambucaba* (<264 h).

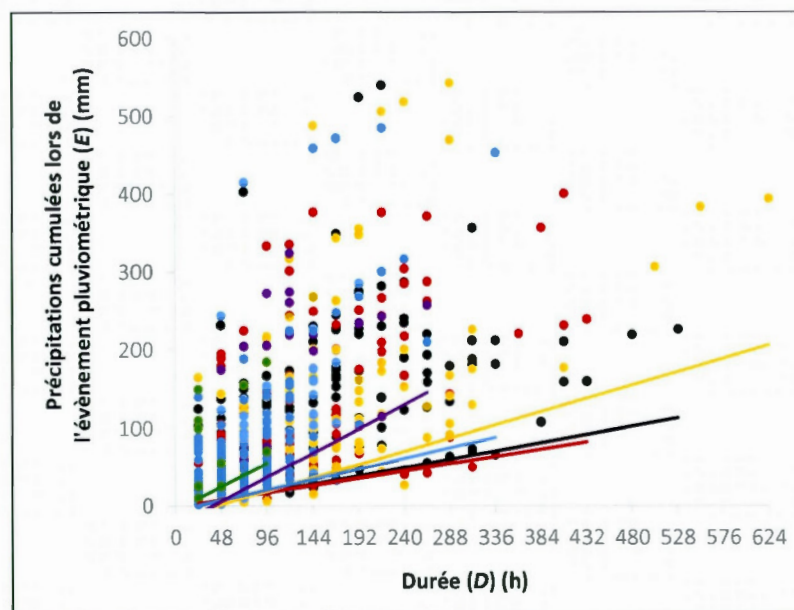
Pour les autres régions, les valeurs pluviométriques seuils sont plus faibles et l'inclinaison des droites moins prononcée; entre 0,195 et 0,354, par comparaison à 0,625 et 0,647 pour *Serra D'água* et *Mambucaba*. Lorsque comparé entre eux, c'est le secteur de *Jacuecanga* qui nécessite le plus de précipitations événementielles pour initier des glissements ( $E = -14.7 + 0.3541*D$ ;  $R^2 = 0,241$ ), suivit de *Japuiba* ( $E = -6.05 + 0.2802*D$ ;  $R^2 = 0,179$ ), *Angra dos Reis* ( $E = -3.753 + 0.2219*D$ ;  $R^2 = 0,172$ ) et *Bracuí* ( $E = -1.38 + 0.195*D$ ;  $R^2 = 0,173$ ). À *Jacuecanga*, les valeurs minimales pour initier des glissements sont de 2,3 mm en 48 heures, 19,3 mm en 96 heures, 27,8 mm en 120 heures et 206,3 en 624 heures (26 jours), alors qu'à *Bracuí*, les valeurs sont de 3,3 mm, 7,9 mm, 17,3 mm, 22 mm et 120 mm pour des événements pluviométriques de durées similaires. Les événements déclencheurs les plus longs ont été observés dans la région *Jacuecanga* (624 h) et les moins longs à *Japuiba* (336 h). Enfin, à l'exception du secteur *Serra D'água* dont les valeurs avoisinent le zéro, les erreurs-types associées à l'estimation des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  varient essentiellement entre 0,022 et 0,704 pour  $\alpha$  et entre 0,001 et 0,007 pour  $\beta$ , avec des valeurs plus faibles pour *Angra dos Reis* et plus élevées pour *Mambucaba*.



**Tableau 4.2**

Seuils *ED* pour la possible occurrence de glissements de terrain établis en fonction des régions pluviométriques dans la municipalité d'Angra dos Reis

Régions pluviométriques	Nombre de glissements	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Erreur-type
Mambucaba	96	$E = -24.885 + 0.647*D$	$24 < D < 264$	$\alpha = 0.704,$ $\beta = 0.007$
Bracuí	257	$E = -1.38 + 0.195*D$	$24 < D < 432$	$\alpha = 0.091,$ $\beta = 0.001$
Serra D'água	11	$E = -5.0 + 0.625*D$	$24 < D < 96$	$\alpha = 0.000,$ $\beta = 0.000$
Japuiba	336	$E = -6.05 + 0.2802*D$	$24 < D < 336$	$\alpha = 0.174,$ $\beta = 0.002$
Angra dos Reis	636	$E = -3.753 + 0.2219*D$	$24 < D < 528$	$\alpha = 0.022,$ $\beta = 0.001$
Jacuecanga	302	$E = -14.7 + 0.3541*D$	$24 < D < 624$	$\alpha = 0.097,$ $\beta = 0.001$



**Figure 4.18** Seuils *ED* minimum (5 %) établis en fonction des régions pluviométriques dans la municipalité d'Angra dos Reis. Les seuils ont été établis à partir de 1640 glissements de terrain déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. Rouge : Bracuí; Noir : Angra dos Reis; Bleu : Japuiba; Jaune : Jacuecanga; Mauve : Mambucaba; Vert : Serra D'água.

### 4.3.2 Seuils *ED* probabilistes

#### 4.3.2.1 À l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis

Des probabilités d'occurrences ont été établies pour la municipalité d'Angra dos Reis en comparant les valeurs de *E* et *D* associées aux 1640 glissements de terrain déclenchés entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 à celles liées aux 950 événements pluviométriques n'ayant pas initié de ruptures au cours de la même période (fig. 4.14). L'équation obtenue à partir des coefficients dégagés par l'analyse de ces données et ultimement intégrée à la fonction logistique  $f(z)$  pour l'occurrence de glissements de terrain correspond à :

$$z = -0.28056 + 0.00949 * E + 0,0025 * D \quad (9)$$

où la valeur de la constante est de -0,28056 et les coefficients des variables indépendantes sont de 0,00949 pour *E* et 0,0025 pour *D*.

Le modèle est jugé significatif en raison de la valeur  $p$  ( $<0,0001$ ) qui est inférieure à 0,05 (intervalle de confiance de 95 %). Ceci permet de rejeter l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) et de conclure qu'au moins une des deux variables indépendantes (*E* et *D*) contribue au déclenchement des glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis. Il est effectivement possible d'affirmer que les deux variables influencent bel et bien l'occurrence de glissements de terrain, eux qui ont des coefficients ( $\beta$ ) estimés dont la signification est inférieure à 0,05 (tabl. 4.3). Les valeurs exponentielles des variables prédictives ( $\text{Exp}(\beta)$ ; tabl. 4.3), lesquelles illustrent le rapport de changement dans les probabilités d'occurrence de glissement de terrain pour un ajustement d'une unité dans la valeur des variables, indiquent que les précipitations événementielles (*E*) et la durée des précipitations (*D*) influencent positivement le déclenchement de glissement de terrain. À ce chapitre, *E* est la variable prédictive la plus significative avec une valeur de 1,00954 par comparaison à 1,0025 pour *D*. Une valeur de 1,0093 signifie qu'une augmentation d'un millimètre de pluie dans la valeur de *E* peut accroître la probabilité de rupture de 0,47 % en fonction d'une probabilité initiale de 0,63. De manière similaire, la valeur de 1,0025 pour la variable *D* suggère une croissance de 0,12 % dans la probabilité d'occurrence pour une précipitation dont la durée augmente d'une heure. Enfin, la classification sommaire du modèle logistique (tabl. 4.4) montre un AIC de 3061,7 et une

capacité prédictive de 61,2 %, avec une précision accrue pour la prévision des événements non-déclencheurs (78,95 %) par rapport aux événements déclencheurs (50,91 %).

**Tableau 4.3**  
Résultats de l'analyse par régression logistique pour les différentes échelles d'analyses

Échelle d'analyse	Paramètres ( $X_i$ )	Coefficient ( $\beta$ )	Erreur-type	Signification (Pr > Chi <sup>2</sup> )	Exposant ( $\beta$ )
Municipalité d'Angra dos Reis*	$E$	0.00949	0.00092	< 0.0001	1.00954
	$D$	0.00250	0.00098	0.01072	1.00250
	Constante ( $\alpha$ )	-0.28056	0.07201	< 0.0001	0.75536
Centre urbain (enregistrements journaliers)***	$E$	0.03104	0.00517	< 0.0001	1.03153
	$D$	-0.00463	0.00264	0.07905	0.99538
	Constante ( $\alpha$ )	0.56895	0.18825	0.00251	1.76642
Centre urbain (enregistrements aux 15 minutes)****	$E$	0.02140	0.00727	0.00325	1.02163
	$D$	0.02797	0.00876	0.00141	1.02837
	Constante ( $\alpha$ )	-2.22987	0.34630	< 0.0001	0.10754

\* Probabilité initiale de rupture de 0.63

\*\*\* Probabilité initiale de rupture de 0.83

\*\*\*\* Probabilité initiale de rupture de 0.49

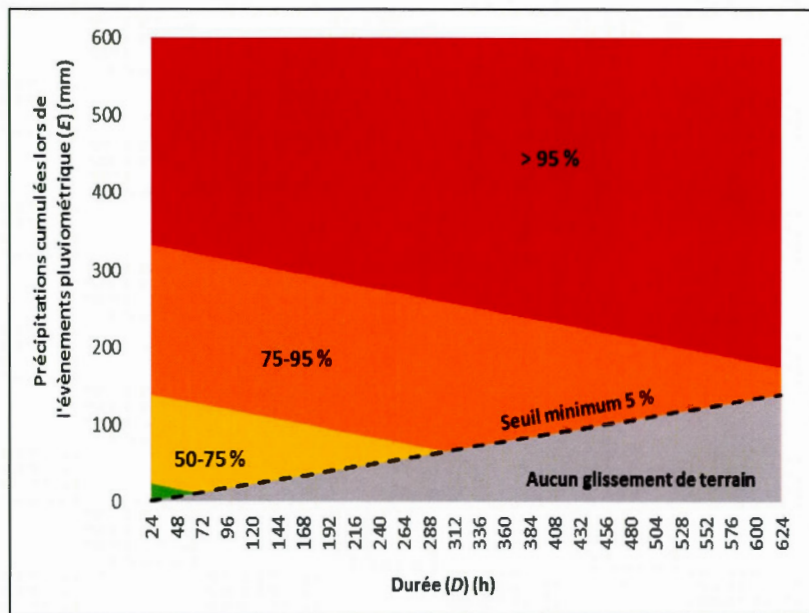
En fonction du modèle dérivé pour la municipalité d'Angra dos Reis, des probabilités de déclenchement ont pu être calculées pour différentes valeurs anticipées de  $E$  et  $D$  se situant au-dessus du seuil pluviométrique établi précédemment (fig. 4.19). Le modèle prévoit ainsi des glissements de terrain avec une fiabilité entre 44,8 et 50 % pour des précipitations cumulées entre 1,3 et 24 mm en 24 heures et entre 6,9 et 17 mm en 48 heures. La capacité prédictive se situe entre 50 et 75 % pour des épisodes pluviométriques cumulant entre 24 et 139 mm en 24 heures, entre 17 et 133 mm en 48 heures, entre 18 et 121 mm en 96 heures, entre 23,5 et 114 mm



en 120 heures et entre 62,4 et 70 mm en 288 heures (12 jours). Pour une fiabilité de 75 à 95 %, des précipitations entre 139 et 334 mm en 24 heures, entre 133 et 328 mm en 48 heures, entre 121 et 315 mm en 96 heures, entre 114 et 309 mm en 120 heures, entre 70 et 264 mm en 288 heures et entre 140,1 et 176 mm en 624 heures (26 jours) doivent être cumulées. Finalement, des glissements de terrain ont une très forte probabilité de se produire (>95 %) si les valeurs de  $E$  surpassent 334 mm en 24 heures, 328 mm en 48 heures, 315 mm en 96 heures, 309 mm en 120 heures, 264 en 288 heures et 176 mm en 624 heures.

**Tableau 4.4**  
Classification sommaire des modèles logistiques pour les différentes échelles d'analyses

Échelle d'analyse	Groupes de paramètres	Point de coupure	AIC		Prédiction			% correct
					Glissement de terrain			
					0	1		
Municipalité d'Angra dos Reis	E et D	0.63	3061.7	Glissement de terrain	0	750	200	78.95
					1	805	835	50.91
				Pourcentage global				61.20
				Centre urbain (enregistrements journaliers)	E et D	0.83	466.4	Glissement de terrain
1	224	302	57.41					
Pourcentage global								61.81
Centre urbain (enregistrements aux 15 minutes)	E et D	0.49	164.4					Glissement de terrain
				1	22	76	77.55	
				Pourcentage global				82.83



**Figure 4.19** Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis en fonction des variables  $E$  et  $D$ . Les probabilités ont été établies à partir de 1640 glissements initiés lors d'évènements pluviométriques et 950 évènements non-déclencheurs inventoriés entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. *Rouge* : probabilité d'occurrence >95 %; *Orange* : probabilité d'occurrence entre 75 et 95 %; *Jaune* : probabilité d'occurrence entre 50 et 75 %; *Vert* : probabilité d'occurrence entre 44,8 et 50 %; *Gris* : probabilité d'occurrence  $\approx 0$  %; *Ligne pointillée* : seuil minimum dont l'équation équivaut à  $E = 0.23125 * D - 4.2$ .

#### 4.3.2.2 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements journaliers

À l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis, des probabilités d'occurrence ont été obtenues en comparant les valeurs de  $E$  et  $D$  associées à 526 glissements de terrain à celles liées à 105 épisodes pluviométriques n'ayant pas initié de glissements au cours de la même période (fig. 4.16). L'équation intégrée à la fonction logistique  $f(z)$  correspond à :

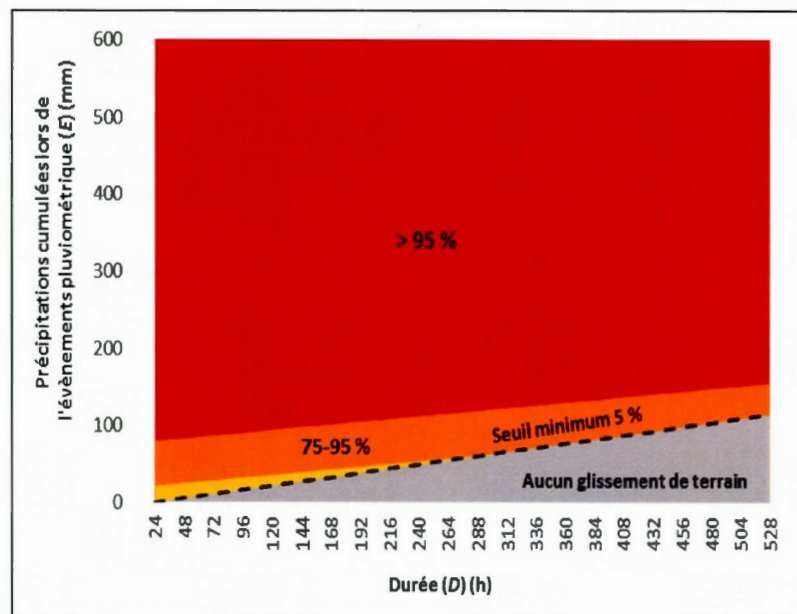
$$z = 0.56895 + 0.03104 * E + 0.00462 * D \quad (11)$$

où la valeur de la constante est de 0,56895 et les coefficients des variables indépendantes sont de 0,03104 pour  $E$  et 0,00462 pour  $D$ .

Le modèle est jugé significatif en raison d'une valeur  $p$  ( $<0,0001$ ) inférieure à 0,05. Ainsi, l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) est rejetée et au moins une des deux variables indépendantes est considérée comme contribuant au déclenchement des glissements de terrain. Les coefficients ( $\beta$ ) estimés par la régression logistique (tabl. 4.3) indiquent que les précipitations événementielles ( $E$ ) contribuent de manière significative à l'occurrence des glissements de terrain, tandis que la durée ( $D$ ) affecte négativement la probabilité d'occurrence. En effet, un rapport de chance (Exp ( $\beta$ )) de 1,03153 pour  $E$  signifie que pour un changement d'unité, la probabilité de déclenchement tend à augmenter de 1,5 %, pour une probabilité asymétrique initiale de 0,83. En contrepartie, la valeur de 0,99538 associée à  $D$  indique qu'un événement pluviométrique prolongé d'une heure tend à diminuer la probabilité d'occurrence de 0,23 %. Cependant, la variable  $D$  n'est pas considérée significative en raison de sa valeur ( $\text{Pr} > \text{Chi}^2$ ) inférieure à 0,05. En ce sens, retirer la variable du modèle n'affecterait pas significativement la capacité prédictive de celui-ci, qui s'établit à 61,81 % (tabl. 4.4). Pour ce modèle, dont l'AIC est de 466,4, les événements non-déclencheurs sont prédits avec une meilleure précision (83,81 %) que les événements déclencheurs (57,41 %).

En ce qui concerne les probabilités d'occurrence dégagées par la fonction logistique (fig. 4.20), elles sont tous supérieures à 61,4 % et ce, peu importe la combinaison de  $E$  et  $D$  anticipée. En ce sens, des glissements sont prévus avec une précision de 61,4 à 75 % si des précipitations événementielles ( $E$ ) totalisent entre 0,25 et 21 mm en 24 heures, entre 5,7 et 25 mm en 48 heures, entre 16,5 et 32 mm en 96 heures, entre 22 et 35 mm en 120 heures et entre 43,8 et 50 mm en 216 heures (9 jours). Pour une probabilité accrue (75 à 95 %), la valeur de  $E$  doit se situer entre 21 et 81 mm en 24 heures, entre 25 et 84 mm en 48 heures, entre 32 et 91 mm en 96 heures, entre 35 et 95 mm en 120 heures, entre 50 et 109 mm en 216 heures et entre 114,6 et 156 mm en 528 heures (22 jours). Enfin, pour toutes les valeurs de  $E$  supérieures à 81 mm en 24 heures, à 84 mm en 48 heures, à 91 mm en 96 heures, à 95 mm en 120 heures, à 109 mm en 216 heures et à 156 mm en 528 heures, des prédictions peuvent être faites avec une précision supérieure à 95 %.





**Figure 4.20** Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis en fonction des variables  $E$  et  $D$ . Les probabilités ont été établies à partir de 526 mouvements de sol initiés lors d'événements pluviométriques et 105 événements non-déclencheurs inventoriés entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. *Rouge* : probabilité d'occurrence >95 %; *Orange* : probabilité d'occurrence entre 75 et 95 %; *Jaune* : probabilité d'occurrence entre 61,4 et 75 %; *Gris* : probabilité d'occurrence  $\approx 0$  %; *Ligne pointillée* : seuil minimum dont l'équation équivaut à  $E = 0.2269 * D - 5.1933$ .

#### 4.3.2.3 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements aux 15 minutes

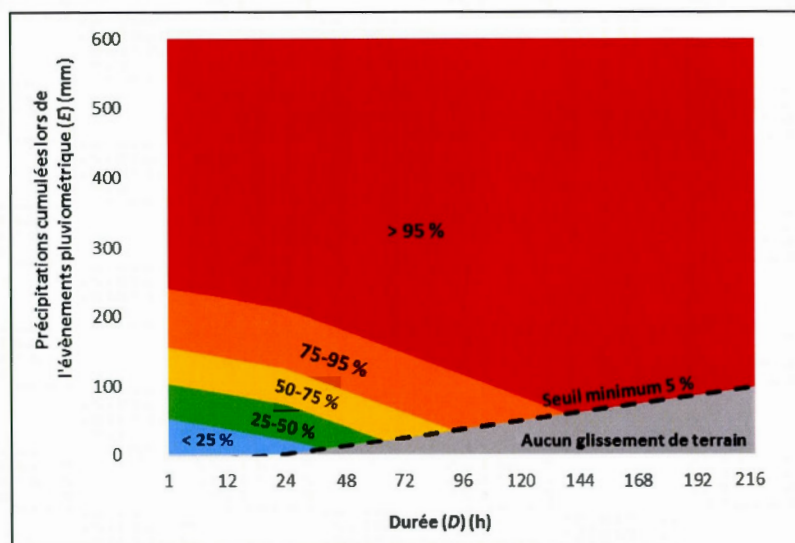
À l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis, mais à partir d'enregistrements pluviométriques réalisés aux 15 minutes, des probabilités d'occurrence ont également été obtenues en mettant en relation les valeurs de  $E$  et  $D$  associées à 98 glissements de terrain à celles liées à 100 épisodes pluviométriques n'ayant pas initié de glissements durant la même période (fig. 4.17). L'équation intégrée à la fonction logistique  $f(z)$  correspond à :

$$z = -2.22987 + 0.0214 * E + 0.02797 * D \quad (12)$$

où la valeur de la constante est de -2,22987 et les coefficients des variables indépendantes sont de 0,0214 pour  $E$  et 0,02797 pour  $D$ .

Le modèle est jugé significatif avec une valeur  $p$  ( $<0,0001$ ) inférieure à 0,05. L'hypothèse nulle ( $H_0$ ) est donc rejetée avec la conclusion qu'au moins une des deux variables indépendantes contribue au déclenchement des glissements de terrain. En fonction des coefficients ( $\beta$ ) estimés par la régression logistique (tabl. 4.3), il est possible d'affirmer que les précipitations cumulées lors des événements pluviométriques ( $E$ ) et la durée des événements contribuent de manière significative à l'initiation de ruptures. Le rapport de chance ( $\text{Exp}(\beta)$ ) de 1,02163 associée à  $E$  indique que pour un changement d'unité, la probabilité de déclenchement tend à augmenter de 1 %, pour une probabilité initiale de 0,49. De manière similaire, la valeur de 1,02837 associée à  $D$  sous-entend un accroissement de la probabilité d'occurrence de 1,3 % par changement d'unité. La classification sommaire du modèle logistique (tabl. 4.4) montre un AIC de 164,4 et une capacité prédictive de 82,83 %, avec une précision relativement similaire pour prédire les événements déclencheurs (77,55 %) et non-déclencheurs (88 %).

En ce qui a trait aux probabilités d'occurrence obtenues par le modèle logistique (fig. 4.21), celui-ci prévoit des mouvements de sol avec une fiabilité de moins de 25 % pour des précipitations événementielles ( $E$ ) inférieures à 52 mm en une heure, inférieures à 38 mm en 12 heures et entre un et 22 mm en 24 heures. Pour une probabilité de déclenchement entre 25 et 50 %, un événement pluviométrique doit cumuler entre 52 et 103 mm en une heure, entre 38 et 89 mm en 12 heures, entre 22 et 73 mm en 24 heures et entre 13,3 et 42 mm en 48 heures. Pour une probabilité se situant entre 50 et 75 %, la valeur de  $E$  doit s'établir entre 103 et 155 mm pour une heure, entre 89 et 140 mm en 12 heures, entre 73 et 125 mm en 24 heures, entre 42 et 93 mm en 48 heures et entre 25,5 et 62 mm en 72 heures. Pour une probabilité de 75 à 95 %, les épisodes pluviométriques doivent cumuler entre 155 et 241 mm en une heure, entre 140 et 227 mm en 12 heures, entre 125 et 211 mm en 24 heures, entre 93 et 180 mm en 48 heures, entre 62 et 148 mm en 72 heures, entre 37,8 et 117 mm en 96 heures et entre 50 et 85 mm en 120 heures. Enfin, pour une prédiction fiable ( $>95$  %), plus de 241 mm en une heure, 227 mm en 12 heures, 211 mm en 24 heures, 180 mm en 48 heures, 148 mm en 72 heures, 117 mm en 96 heures, 85 mm en 120 heures et 99 mm en 216 heures doivent être cumulés.



**Figure 4.21** Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis en fonction des variables  $E$  et  $D$  (enregistrements aux 15 minutes). Les probabilités ont été établies à partir de 98 mouvements de sol initiés lors d'évènements pluviométriques et 100 évènements non-déclencheurs inventoriés entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013. *Rouge* : probabilité d'occurrence >95 %; *Orange* : probabilité d'occurrence entre 75 et 95 %; *Jaune* : probabilité d'occurrence entre 50 et 75 %; *Vert* : probabilité d'occurrence entre 25 et 50 %; *Bleu* : probabilité d'occurrence entre 10 et 25 %; *Gris* : probabilité d'occurrence  $\approx 0$  %; *Ligne pointillée* : seuil minimum dont l'équation équivaut à  $E = 0.5104 * D - 11.181$ .

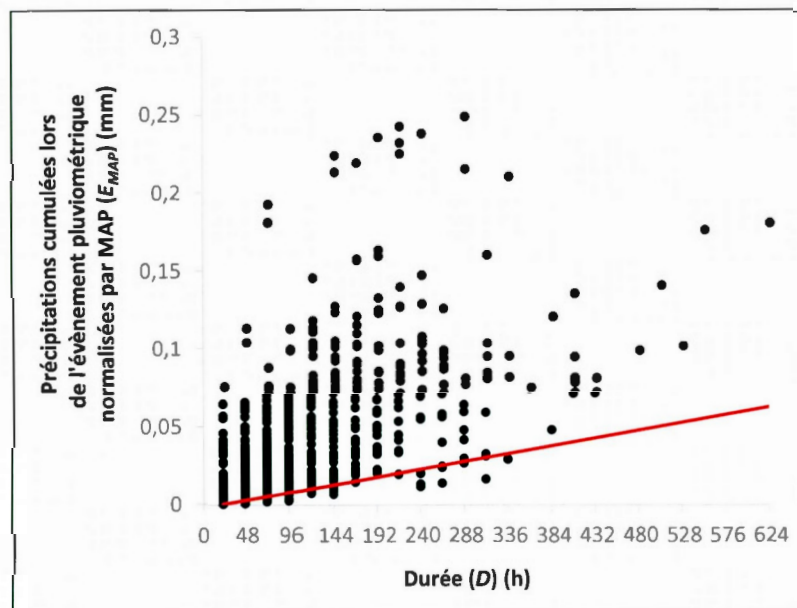
#### 4.3.3 Seuils $ED$ normalisés par la $MAP$ ( $E_{MAP}D$ )

##### 4.3.3.1 À l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis

De manière à faciliter la généralisation des seuils  $ED$  établis à d'autres sites, les valeurs des précipitations cumulées lors des évènements pluviométriques ( $E$ ) ont été normalisées par la moyenne pluviométrique annuelle ( $MAP$ ) associée à la région pluviométrique pour l'année d'occurrence du glissement. Dans la municipalité d'Angra dos Reis, l'étendue couverte par les précipitations événementielles remises à l'échelle par la  $MAP$  est de  $1,00 \times 10^{-3}$  à  $2,48 \times 10^{-1}$  ( $h^{-1}$ ) (fig. 4.22). Le seuil  $E_{MAP}D$  obtenu correspond à  $E_{MAP} = 0.0001 * D - 0.0019$  ( $R^2 = 0,168$ ) pour des évènements dont la durée varie entre 24 et 624 heures (26 jours) (tabl. 4.5). De la sorte, le seuil établi indique que des glissements de terrain sont susceptibles de survenir si  $E$  surpasse



0,05 % de la  $MAP$  en 24 heures, 0,3 % en 48 heures, 0,8 % en 96 heures, 1,05 % en 120 heures et 6,31 % en 624 heures. Enfin, pour les paramètres d'interception ( $\alpha$ ) et de pente ( $\beta$ ), les valeurs associées de 0,0001 et -0,0019 représentent une remise à l'échelle de 2312,5 et de 2210,52 par rapport aux valeurs établies sans normalisation.



**Figure 4.22** Seuil  $E_{MAP}D$  minimum (5 %) établi pour la municipalité d'Angra dos Reis à partir de 1640 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.

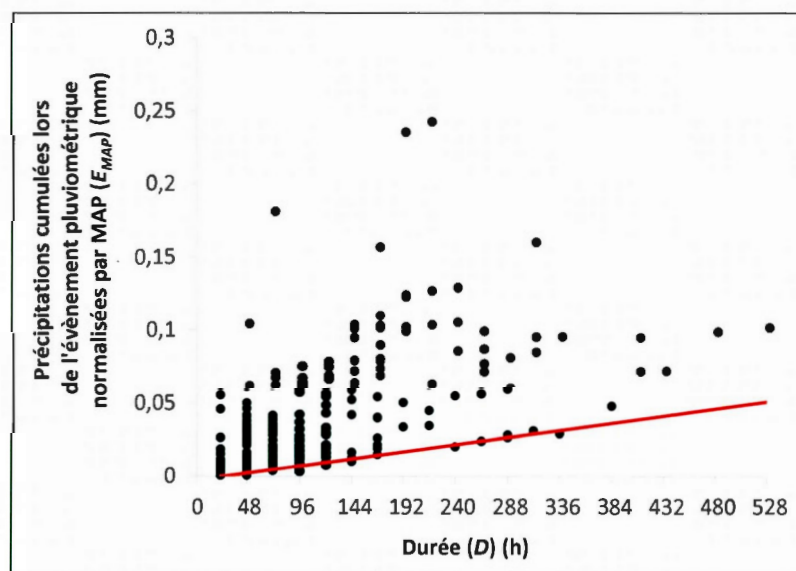
**Tableau 4.5**

Seuils  $E_{MAP}D$  pour la possible occurrence de glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis

#	Échelle d'analyse	Nombre de glissements	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Erreur-type
1	Municipalité d'Angra dos Reis	1640	$E_{MAP} = -0.0019 + 0.0001 * D$	$24 < D < 624$	$\alpha = 0.000,$ $\beta = 0.000$
2	Centre urbain (enregistrements journaliers)	526	$E_{MAP} = -0.0023 + 0.0001 * D$	$24 < D < 528$	$\alpha = 0.000,$ $\beta = 0.000$
3	Centre urbain (enregistrements aux 15 minutes)	98	$E_{MAP} = -0.0061 + 0.0003 * D$	$0.25 < D < 216$	$\alpha = 0.000,$ $\beta = 0.000$

#### 4.3.3.2 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements journaliers

À l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis, le seuil  $ED$  normalisé par la  $MAP$  établi à partir de 526 glissements est représenté par l'équation  $E_{MAP} = 0.0001 * D - 0.0023$  ( $R^2 = 0,182$ ) (tabl. 4.5). Des glissements de terrain devraient se produire si des épisodes pluviométriques cumulent plus de 0,01 % de la  $MAP$  en 24 heures, 0,25 % en 48 heures, 0,74 % en 96 heures, 0,98 % en 120 heures et 5,14 % en 528 heures (22 jours). L'amplitude associée aux précipitations cumulées lors des événements pluviométriques normalisés par la  $MAP$  est de  $1,00 \times 10^{-3}$  à  $2,42 \times 10^{-1} \text{ (h}^{-1}\text{)}$  (fig. 4.23). La remise à l'échelle des paramètres empiriques  $\alpha$  et  $\beta$  est de 2269 et 2257,9 et ce, en fonction du seuil  $ED$  précédemment établi dans le centre urbain à partir d'enregistrements pluviométriques journaliers ( $E = 0.2269 * D - 5.1933$ ).

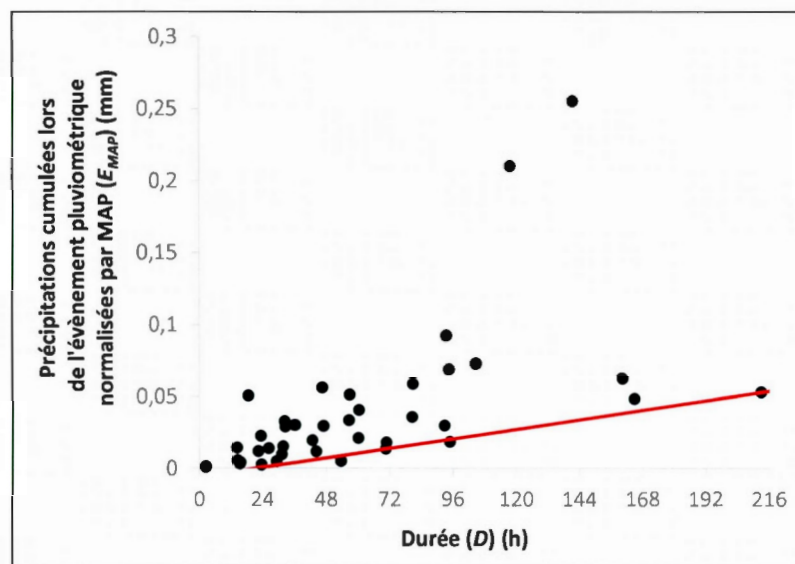


**Figure 4.23** Seuil  $E_{MAP}D$  minimum (5 %) établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 526 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.

#### 4.3.3.3 À l'échelle locale du Centre urbain – enregistrements aux 15 minutes

Un seuil  $E_{MAP}D$  a été établi à partir de l'analyse des variables  $E$  et  $D$  enregistrés à toutes les 15 minutes et associées aux 98 glissements répertoriés. Les valeurs de  $E$  remises à l'échelle par la

$MAP$  s'étendent de  $1,00 \times 10^{-3}$  à  $2,55 \times 10^{-1}$  ( $h^{-1}$ ) pour des épisodes pluviométriques dont la durée varie entre 24 et 216 heures (9 jours) (fig. 4.24). Le seuil minimum correspond à  $E_{MAP} = 0,0003 \cdot D - 0,0061$  ( $R^2 = 0,206$ ) (tabl. 4.5). Ainsi, des glissements sont attendus lors de précipitations surpassant -0,5 % de la MAP en 24 heures, -0,2 % en 12 heures, 0,05 % en 24 heures, 0,7 % en 48 heures, 2 % en 96 heures, 2,7 % en 120 heures et 5,3 % en 216 heures. Enfin, pour les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$ , les valeurs associées de 0,0003 et -0,0061 représentent une remise à l'échelle de 1701,3 et de 1832,9 par rapport aux valeurs établies sans normalisation.



**Figure 4.24** Seuil  $E_{MAP}D$  minimum (5 %) établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 98 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013.

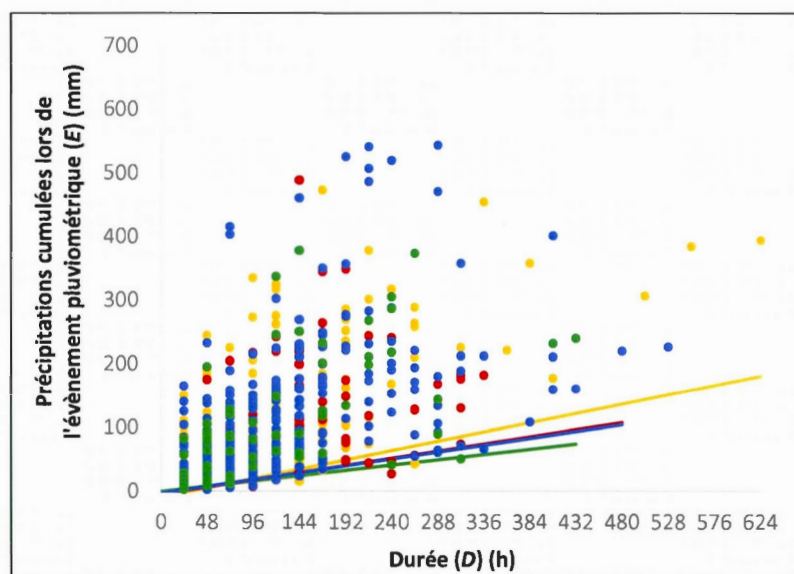
#### 4.3.4 Seuils $ED$ établis en fonction des caractéristiques biophysiques

##### 4.3.4.1 Seuils $ED$ pour divers domaines lithologiques

Afin d'évaluer si certains domaines lithologiques sont plus propices à l'occurrence de glissements de terrain que d'autres, des seuils  $ED$  ont été proposés à l'échelle de la municipalité d'Angra dos Reis pour les granites, les orthogneiss, les paragneiss et les dépôts alluviaux et fluvio-marins (DAFM) (tabl. 4.6). D'un point de vue graphique, ce sont les DAFM qui possèdent le seuil minimum le plus élevé, suivit des granites et orthogneiss dont les valeurs



sont similaires (fig. 4.25). Pour les *DAFM*, le seuil de  $E = -9.65 + 0.3052 \cdot D$  ( $R^2 = 0,20$ ) indique que des glissements sont susceptibles de survenir lors de précipitations événementielles supérieures à -2,32 mm en 24 heures, 5 mm en 48 heures, 19,65 mm en 96 heures, 26,97 mm en 120 heures et 180,8 mm en 624 heures. Pour les granites et orthogneiss, dont les équations sont de  $E = -5.008 + 0.2345 \cdot D$  ( $R^2 = 0,165$ ) et  $E = -3.511 + 0.22407 \cdot D$  ( $R^2 = 0,169$ ), les valeurs seuils équivalent plutôt à recevoir un minimum de 0,62 à 1,86 mm en 24 heures, 6,25 à 7,24 mm en 48 heures, 17,5 mm à 18 mm en 96 heures, 23,13 à 23,37 mm en 120 heures et 104 à 107,5 mm en 480 heures (20 jours). Enfin, l'équation de  $E = -0.8148 + 0.1728 \cdot D$  ( $R^2 = 0,185$ ) associée aux paragneiss montre une propension aux ruptures si plus de 3,3 mm sont cumulés en 24 heures, 7,48 mm en 48 heures, 15,7 mm en 96 heures, 19,9 mm en 120 heures et 73,85 mm en 432 heures (18 jours). Les valeurs des paramètres  $\alpha$  varient entre 0,1728 (paragneiss) et 0,3052 (*DAFM*), tandis que celles associées au paramètre  $\beta$  oscillent entre -0,8148 (paragneiss) et -9,65 (*DAFM*). En ce qui a trait aux erreurs-type liés à l'estimation de ces mêmes paramètres, elles sont plus élevées pour les granites et plus faibles pour les orthogneiss.



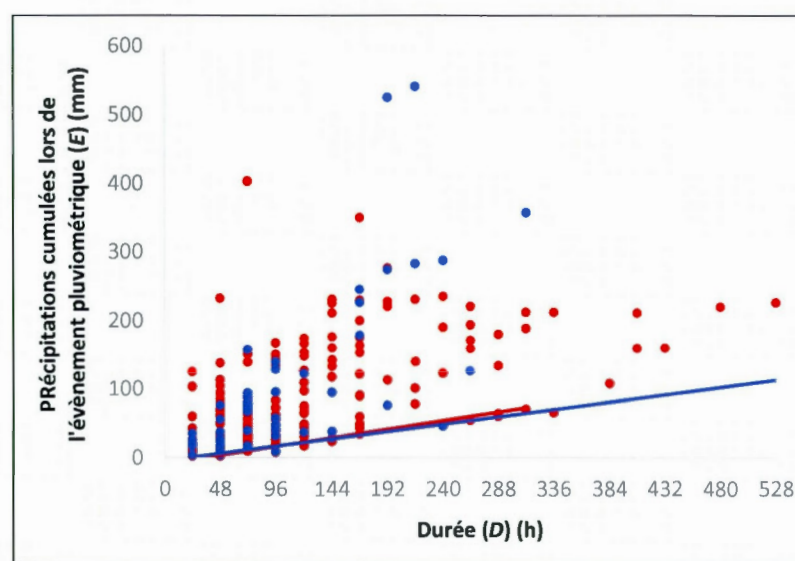
**Figure 4.25** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour divers domaines lithologiques dans la municipalité d'Angra dos Reis à partir de 1640 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. Jaune : dépôts alluviaux et fluvio-marins; Rouge : granite; Bleu : orthogneiss; Vert : paragneiss.

**Tableau 4.6**  
Seuils  $ED$  pour la possible occurrence de glissements de terrain établis pour divers domaines lithologiques dans la municipalité d'Angra dos Reis

#	Échelle d'analyse	Nombre de glissements	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Erreur-type
1	Municipalité d'Angra dos Reis - Granite	307	$E = -5.008 + 0.2345 * D$	$24 < D < 480$	$\alpha = 1.248,$ $\beta = 0.019$
2	Municipalité d'Angra dos Reis - Orthogneiss	693	$E = -3.511 + 0.22407 * D$	$24 < D < 528$	$\alpha = 0.004,$ $\beta = 0.000$
3	Municipalité d'Angra dos Reis - Paragneiss	110	$E = -0.8148 + 0.1728 * D$	$24 < D < 432$	$\alpha = 0.252,$ $\beta = 0.002$
4	Municipalité d'Angra dos Reis - Dépôts alluviaux et fluvio-marins	530	$E = -9.65 + 0.3052 * D$	$24 < D < 624$	$\alpha = 0.316,$ $\beta = 0.003$
5	Centre urbain (enregistrements journaliers) - Granite	77	$E = -8.88 + 0.2614 * D$	$24 < D < 312$	$\alpha = 0.407,$ $\beta = 0.003$
6	Centre urbain (enregistrements journaliers) - Orthogneiss	449	$E = -4.711 + 0.2231 * D$	$24 < D < 528$	$\alpha = 0.059,$ $\beta = 0.000$
7	Centre urbain (enregistrements aux 15 minutes) - Granite	22	$E = -88.84 + 2.1206 * D$	$0.25 < D < 144$	$\alpha = 3.596,$ $\beta = 0.042$
8	Centre urbain (enregistrements aux 15 minutes) - Orthogneiss	76	$E = -11.181 + 0.5103 * D$	$0.25 < D < 216$	$\alpha = 0.517,$ $\beta = 0.005$

À l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis, des seuils ont été établis à partir des données pluviométriques journalières ( $E$  et  $D$ ) provenant des glissements s'étant produits dans les granites et les orthogneiss. Les seuils proposés sont similaires avec des valeurs minimales supérieures pour les orthogneiss lorsque des événements pluviométriques ont une durée inférieure à 96 heures, et des valeurs supérieures pour les granites lorsque ces événements durent plus de 96 heures (fig. 4.26). L'équation associée aux granites est de  $E = -8.88 + 0.2614 * D$  ( $R^2 = 0,186$ ) et a été établie à partir de 77 glissements de terrain survenus lors d'épisodes pluviométriques d'une durée allant de 24 à 312 heures. En contrepartie, l'équation associée aux orthogneiss est de  $E = -4.711 + 0.2231 * D$  ( $R^2 = 0,183$ ) et a été développée à partir de 449 glissements survenus lors de précipitations d'une durée variant entre

24 et 528 heures. Pour les granites, le seuil proposé sous-entend que des glissements de terrain sont susceptibles d'être déclenchés lors de précipitations supérieures à 3,6 mm en 48 heures, 16,2 mm en 96 heures, 22,4 mm en 120 heures et 72,6 mm en 312 heures (13 jours). Pour les orthogneiss, les valeurs seuils sont plutôt de 0,64 mm en 24 heures, 6 mm en 48 heures, 16,7 mm en 96 heures, 22,06 mm en 120 heures, 64,9 mm en 312 heures et 113,1 mm en 528 heures. Enfin, les erreurs-types des paramètres empiriques sont plus élevées pour les granites que pour les orthogneiss (tabl. 4.6).

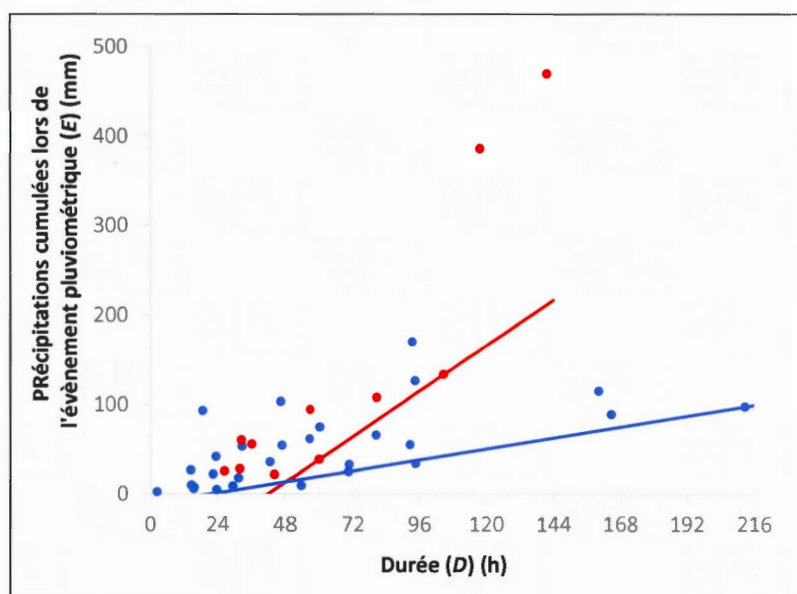


**Figure 4.26** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour divers domaines lithologiques dans le centre urbain Angra dos Reis à partir de 526 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. Rouge : granite; Bleu : orthogneiss.

À partir des données pluviométriques enregistrées aux 15 minutes, des seuils  $ED$  ont aussi été établis pour le centre urbain depuis 22 glissements survenus dans les granites et 76 dans les orthogneiss (tabl. 4.6). L'équation de la droite liée aux granites correspond à  $E = -88.84 + 2.1206 \cdot D$  ( $R^2 = 0,686$ ) pour des épisodes pluviométriques d'une durée allant de 15 minutes à 144 heures (6 jours) (fig. 4.27). Pour les orthogneiss, le seuil est de  $E = -11.181 + 0.5103 \cdot D$  ( $R^2 = 0,197$ ) et correspond à des événements dont la durée a oscillé entre 15 minutes et 216 heures (9 jours). Ces seuils montrent que les précipitations événementielles requises pour initier des glissements sont légèrement supérieures dans les orthogneiss pour des précipitations d'une durée inférieure à 48 heures, et plus élevées dans les granites pour  $D > 48$  heures. Des



ruptures risquent de se produire dans les orthogneiss si les valeurs de  $E$  surpassent 1 mm en 24 heures, 13,3 mm en 48 heures, 37,8 mm en 96 heures, 62,3 mm en 144 heures et 99 mm en 216 heures. Pour les granites, des glissements sont attendus si  $E$  surpasse 12,9 mm en 48 heures, 114,7 mm en 96 heures et 216,5 mm en 144 heures. Par conséquent, des glissements ne risquent pas de se produire dans les granites avec des précipitations d'une durée inférieure à 48 heures et de 24 heures pour les orthogneiss. Les paramètres empiriques ( $\alpha$  et  $\beta$ ) associés aux granites ont des erreurs-types plus élevées que ceux liés aux orthogneiss.

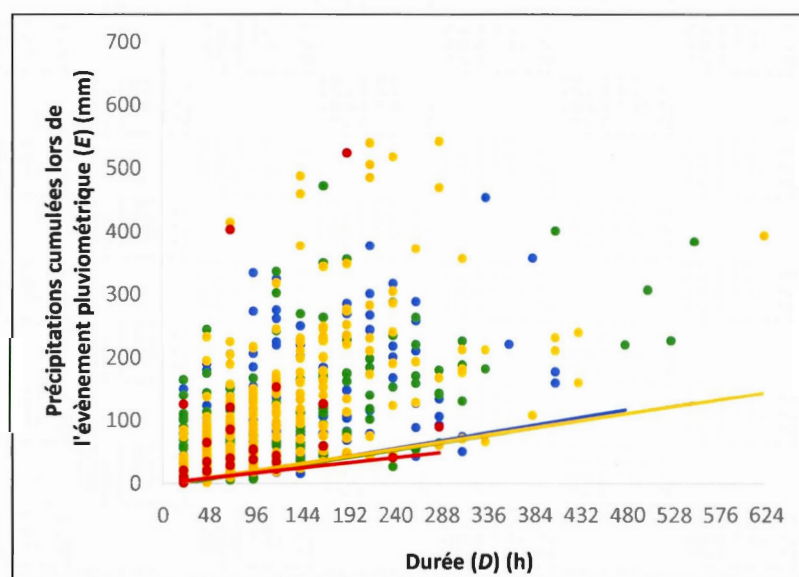


**Figure 4.27** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour divers domaines lithologiques dans le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 98 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013. Rouge : granite; Bleu : orthogneiss.

#### 4.3.4.2 Seuils $ED$ pour divers angles de pente

Des seuils  $ED$  ont été établis en fonction de diverses classes d'inclinaison associées aux 1640 glissements de terrain déclenchés dans la municipalité d'Angra dos Reis. Au total, 585 ruptures ont été initiées sur des pentes entre 0 et 10°, 570 entre 10 et 20°, 451 entre 20 et 35° et 34 sur des versants inclinés à plus de 35° (tabl. 4.7). Les seuils  $ED$  proposés sont similaires entre eux pour des épisodes pluviométriques dont la durée varie entre 24 et 72 heures (fig. 4.28). En effet, des glissements de terrain sont attendus lors d'événements pluviométriques cumulant entre 0

et 4 mm en 24 heures, entre 6 et 8 mm en 48 heures et entre 11,7 et 13,9 mm en 72 heures et ce, toutes catégories confondues. Toutefois, lorsque des épisodes durent plus de trois jours, les pentes qui ont plus de 35° nécessitent moins de précipitations pour le déclenchement de glissements de terrain par comparaison aux autres classes d'inclinaison. En effet, le seuil de  $E = -0.077 + 0.1699 \cdot D$  ( $R^2 = 0,159$ ) associé à des pentes supérieures à 35° indique que plus de 16,2 mm en 96 heures, 24,3 mm en 144 heures et 48,8 mm en 288 heures (12 jours) sont requis pour initier des glissements par comparaison à des valeurs de 17,5 à 19,5 mm en 96 heures, 29,1 à 30,8 mm en 144 heures et 63,8 à 67,3 mm en 288 heures pour les autres classes. En fait, ce sont les pentes inférieures à 10° ( $E = -6.23 + 0.255 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,174$ ) qui possèdent les valeurs seuils les plus élevées. En ce qui concerne les angles entre 10 et 20° ( $E = -5.56 + 0.24083 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,172$ ) et entre 20 et 35° ( $E = -3.0583 + 0.2357 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,179$ ), les valeurs de  $E$  sont sensiblement les mêmes pour toutes les durées pluviométriques considérées ( $24 < D < 624$ ). Enfin, les erreurs-types associées au paramètre  $\alpha$  ont des valeurs variant entre 0,054 (10 à 20°) et 0,332 (>35°), tandis que pour le paramètre  $\beta$ , les erreurs-types oscillent entre zéro (10 à 20°) et 0,003 (>35°).



**Figure 4.28** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour divers angles de pente à partir de 1640 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans la municipalité d'Angra dos Reis. *Bleu* : 0 à 10°; *Vert* : 10 à 20°; *Jaune* : 20 à 35°; *Rouge* : >35°.

**Tableau 4.7**

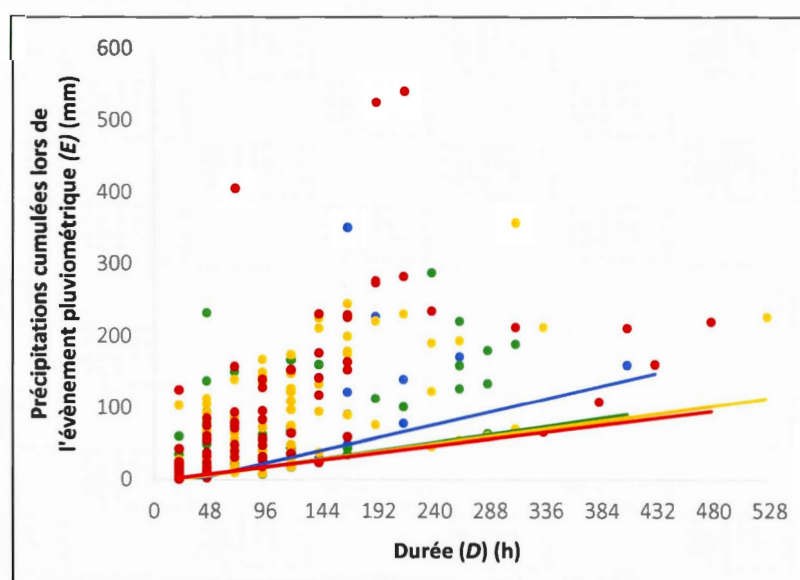
Seuils *ED* pour la possible occurrence de glissements de terrain établis pour diverses classes d'inclinaison des versants dans la municipalité d'Angra dos Reis

#	Échelle d'analyse	Angle de pente	Nombre de glissements	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Erreur-type
1	Municipalité d'Angra dos Reis	0 à 10°]	585	$E = -6.23 + 0.255 * D$	24 < D < 480	$\alpha = 0.121,$ $\beta = 0.001$
2		]10 à 20°]	570	$E = -5.56 + 0.24083 * D$	24 < D < 552	$\alpha = 0.054,$ $\beta = 0.000$
3		]20 à 35°]	451	$E = -3.0583 + 0.2357 * D$	24 < D < 624	$\alpha = 0.248,$ $\beta = 0.002$
4		> 35°	34	$E = -0.077 + 0.1699 * D$	24 < D < 288	$\alpha = 0.332,$ $\beta = 0.003$
5	Centre urbain (enregistrements journaliers)	0 à 10°]	59	$E = -14.33 + 0.375 * D$	24 < D < 432	$\alpha = 0.136,$ $\beta = 0.001$
6		]10 à 20°]	162	$E = -5.673 + 0.2369 * D$	24 < D < 408	$\alpha = 0.177,$ $\beta = 0.001$
7		]20 à 35°]	206	$E = -4.627 + 0.22245 * D$	24 < D < 528	$\alpha = 0.086,$ $\beta = 0.001$
8		> 35°	99	$E = -2.369 + 0.2028 * D$	24 < D < 480	$\alpha = 0.292,$ $\beta = 0.002$
9	Centre urbain (enregistrements aux 15 minutes)	0 à 10°]	10	$E = -10.175 + 1.369 * D$	0.25 < D < 144	$\alpha = 5.825,$ $\beta = 0.063$
10		]10 à 20°]	29	$E = -39.894 + 0.9176 * D$	0.25 < D < 168	$\alpha = 14.131,$ $\beta = 0.151$
11		]20 à 35°]	40	$E = 0.314 + 0.4563 * D$	0.25 < D < 216	$\alpha = 0.487,$ $\beta = 0.005$
12		> 35°	19	$E = -22.923 + 0.6769 * D$	0.25 < D < 168	$\alpha = 0.706,$ $\beta = 0.008$

À l'échelle du centre urbain, on enregistre 59 glissements de terrain déclenchés sur des pentes entre 0 et 10°, 162 glissements sur des pentes entre 10 et 20°, 206 glissements sur des pentes entre 20 et 35° et 99 glissements sur des pentes de plus de 35°. Ceux-ci ont permis l'établissement de seuils *ED* (tabl. 4.7), lesquels sont relativement similaires pour des durées

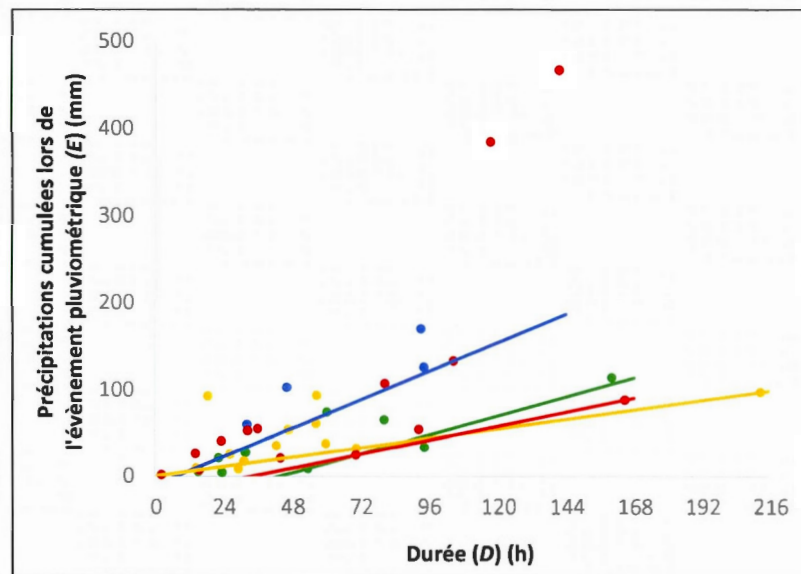


pluviométriques entre 24 et 72 heures (fig. 4.29). Effectivement, les valeurs seuils varient entre - 5,3 et 2,5 mm en 24 heures, entre 3,6 et 7,3 mm en 48 heures et entre 11,3 et 12,6 mm en 72 heures. Lors d'épisodes excédant 72 heures, des précipitations événementielles plus importantes sont requises pour initier des glissements de terrain sur des pentes de 0 à 10° ( $E = -14.33 + 0.375 * D$ ;  $R^2 = 0,325$ ), par comparaison aux pentes dont l'inclinaison dépasse 10°. Des valeurs de  $E$  surpassant 21,6 mm en 96 heures, 39,6 mm en 144 heures, 93,6 mm en 288 heures et 147,6 mm en 432 heures (18 jours) sont requises pour déclencher des glissements sur des pentes faiblement inclinées (0 à 10°) par comparaison à des valeurs de 16,7 à 17,1 mm en 96 heures, 26,8 à 28,4 mm en 144 heures, 56 à 62,5 mm en 288 heures et 85,2 à 96,6 mm en 432 heures pour des terrains plus fortement inclinés (>10°). Ce sont les angles de pente inférieures à 20° ( $E = -5.673 + 0.2369 * D$ ;  $R^2 = 0,189$ ) qui possèdent les valeurs seuils les plus élevées, suivit de la classe de 20 à 35° ( $E = -4.627 + 0.22245 * D$ ;  $R^2 = 0,173$ ) et >35° ( $E = -2.369 + 0.2028 * D$ ;  $R^2 = 0,157$ ). En ce qui concerne les erreurs-types associées aux différentes catégories analysées, elles varient très peu et ce, tant pour le paramètre empirique d'inclinaison ( $\beta$ ; 0,001 à 0,002) que pour le paramètre d'interception ( $\alpha$ ; 0,086 à 0,292).



**Figure 4.29** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour divers angles de pente à partir de 526 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis. *Bleu* : 0 à 10°; *Vert* : 10 à 20°; *Jaune* : 20 à 35°; *Rouge* : >35°.

Les précipitations événementielles enregistrées aux 15 minutes et la durée des épisodes pluviométriques associées à 10 glissements de terrain déclenchés sur des pentes de 0 à 10°, 29 sur des pentes de 10 à 20°, 40 sur des pentes de 20 à 35° et 19 sur des pentes de plus de 35°, ont permis l'établissement de seuils  $ED$  pour le centre urbain d'Angra dos Reis (tabl. 4.7). Ce sont les pentes inclinées entre 0 et 10° qui nécessitent le plus de précipitations événementielles pour initier des glissements ( $E = -10.175 + 1.369 * D$ ;  $R^2 = 0,452$ ) et ce, pour des épisodes dont la durée varie entre 12 et 144 heures (fig. 4.30). Les valeurs seuils correspondent à 6,2 mm en 12 heures, 22,6 mm en 24 heures, 55,5 mm en 48 heures, 121,3 mm en 96 heures et 187 mm en 144 heures. Pour les autres seuils établis et des durées pluviométriques variant entre 12 et 72 heures, ce sont les pentes inclinées entre 20 et 35° qui requièrent le plus de précipitations événementielles ( $E = 0.314 + 0.4563 * D$ ;  $R^2 = 0,179$ ), soit 5,7 mm en 12 heures, 11,2 mm en 24 heures, 22,2 mm en 48 heures et 33,1 mm en 72 heures, par comparaison à 9,5 et 4,1 mm en 48 heures et 25,8 et 26,1 mm en 72 heures pour les pentes supérieures à 35° ( $E = -22,923 + 0,6769 * D$ ;  $R^2 = 0,275$ ) et les pentes entre 10 et 20° ( $E = -39,894 + 0,9176 * D$ ;  $R^2 = 0,334$ ). Des glissements de terrain ne sont donc pas attendus sur des pentes inclinées entre 10 et 20° et supérieures à 35° pour des épisodes pluviométriques d'une durée inférieure à 32 heures. Lorsque la durée des événements pluviométriques dépasse 72 heures, ce sont toutefois les pentes entre 10 et 20° qui nécessitent le plus de précipitations pour l'occurrence de glissements de terrain, suivit des pentes supérieures à 35° et les pentes inclinées entre 20 et 35°. Les valeurs de  $E$  varient ainsi entre 42 et 48,2 mm en 96 heures, entre 66 et 92,2 mm en 144 heures, entre 76,9 et 114,2 mm en 168 heures et entre 98,8 et 158,3 mm en 216 heures en fonction des seuils considérés. Concernant les erreurs-types associées à l'estimation des paramètres empiriques, elles sont plus prononcées pour les classes de 10 à 20° ( $\alpha = 14,131$ ;  $\beta = 0,151$ ) et de 0 à 10° ( $\alpha = 5,825$ ;  $\beta = 0,063$ ) et moins élevées pour les pentes supérieures à >35° ( $\alpha = 0,706$ ;  $\beta = 0,008$ ) et celles entre 20 et 35° ( $\alpha = 0,487$ ;  $\beta = 0,005$ ).



**Figure 4.30** Seuils *ED* minimums (5 %) établis pour divers angles de pente à partir de 98 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis. *Bleu* : 0 à 10°; *Vert* : 10 à 20°; *Jaune* : 20 à 35°; *Rouge* : >35°.

#### 4.3.4.3 Seuils *ED* en fonction de l'orientation des pentes

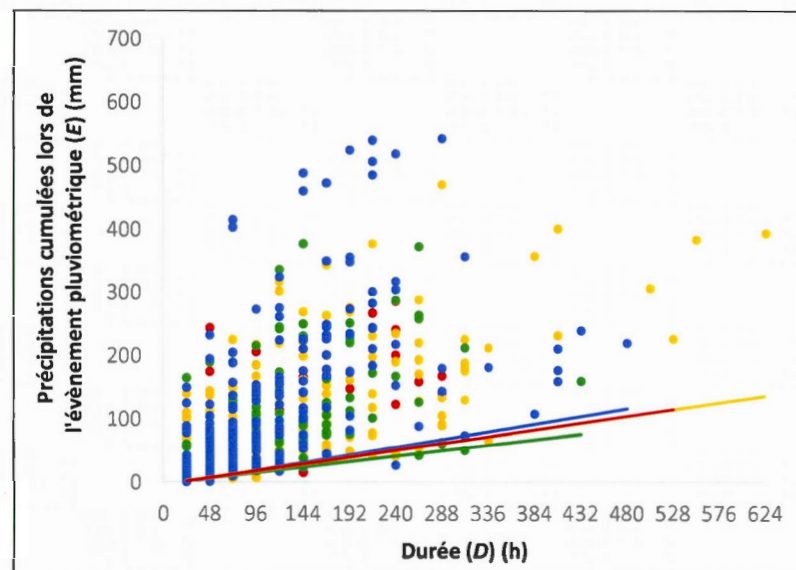
Des seuils *ED* ont été établis selon l'orientation de la pente (nord, sud, est et ouest) associée aux différents glissements de terrain déclenchés dans la municipalité d'Angra dos Reis. Au total, 408 ruptures sont survenues sur des pentes orientées au nord, 251 à l'est, 562 au sud et 290 à l'ouest (tabl. 4.8). Les précipitations événementielles (*E*) requises pour initier des glissements varient très peu entre les différents seuils pour des durées pluviométriques allant de 24 à 168 heures (7 jours) (fig. 4.31). En effet, les valeurs seuils oscillent entre 0,1 et 2 mm pour 24 heures de précipitations, entre 6,2 et 7,2 mm pour 48 heures, entre 15 et 18,4 mm en 96 heures et entre 28,1 et 36,7 mm en 168 heures. Pour des événements pluviométriques dont la durée dépasse sept jours, il est toutefois possible d'observer des différences plus prononcées entre les valeurs seuils, particulièrement pour les versants orientés au nord ( $E = -6.036 + 0.2549 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,171$ ) avec des valeurs plus élevées et ceux orientés à l'est ( $E = -2.35 + 0.18125 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,150$ ) avec des valeurs plus faibles. Des précipitations événementielles de 28,1 (est) et 42,9 mm (nord) en 192 heures, 45,5 et 61,2 mm en 264 heures, 84,6 et 116,3 en



480 heures et 110,7 et 153 mm en 624 heures représentent le minimum requis pour déclencher des glissements de terrain à Angra dos Reis. Pour les pentes orientées au sud ( $E = -3.53 + 0.2243*D$ ;  $R^2 = 0,171$ ) et à l'ouest ( $E = -0.077 + 0.1699*D$ ;  $R^2 = 0,162$ ), les seuils sont similaires, l'écart entre les deux droites n'excédant pas un millimètre pour l'ensemble des durées considérées ( $24 < D < 624$ ). Ce sont les versants orientés au sud et à l'est qui possèdent les erreurs-types les plus élevées avec des valeurs respectives de 0,6385 et 3,738 pour le paramètre d'interception ( $\alpha$ ) et de 0,046 et 0,032 pour le paramètre d'inclinaison ( $\beta$ ). En revanche, les versants orientés au nord et à l'ouest ont des erreurs-types plus faibles avec des valeurs respectives de 0,559 et 0,975 pour  $\alpha$  et de 0,005 et 0,007 pour  $\beta$ .

**Tableau 4.8**  
Seuils  $ED$  pour la possible occurrence de glissements de terrain établis pour diverses orientations de pente dans la municipalité d'Angra dos Reis

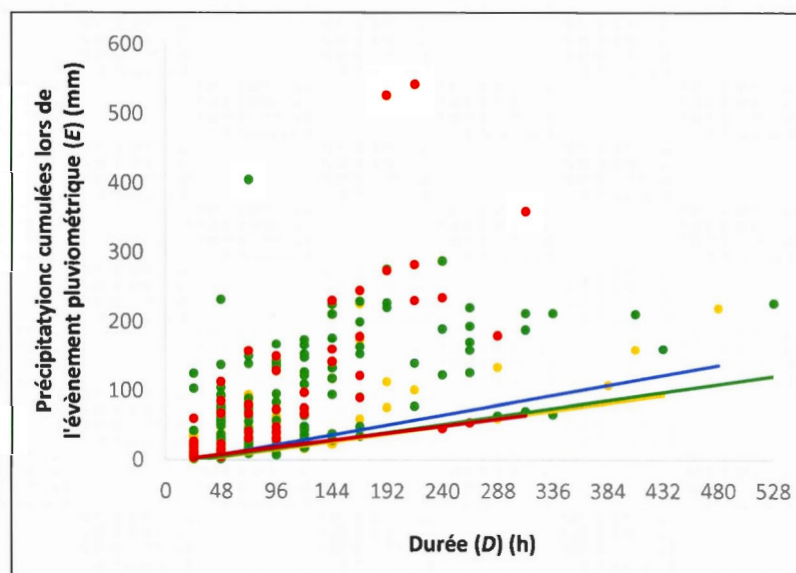
#	Échelle d'analyse	Orientations de la pente	Nombre de glissements	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Erreur-type
1	Municipalité d'Angra dos Reis	Nord	408	$E = -6.036 + 0.2549*D$	$24 < D < 480$	$\alpha = 0.559,$ $\beta = 0.005$
2		Est	251	$E = -2.35 + 0.18125*D$	$24 < D < 432$	$\alpha = 3.738,$ $\beta = 0.032$
3		Sud	562	$E = -3.53 + 0.2243*D$	$24 < D < 624$	$\alpha = 6.385,$ $\beta = 0.046$
4		Ouest	290	$E = -0.077 + 0.1699*D$	$24 < D < 528$	$\alpha = 0.975,$ $\beta = 0.007$
5	Centre urbain (enregistrements journaliers)	Nord	113	$E = -6.49 + 0.2977*D$	$24 < D < 480$	$\alpha = 0.107,$ $\beta = 0.001$
6		Est	71	$E = -6.929 + 0.2311*D$	$24 < D < 432$	$\alpha = 0.292,$ $\beta = 0.002$
7		Sud	277	$E = -6.373 + 0.2411*D$	$24 < D < 528$	$\alpha = 0.083,$ $\beta = 0.001$
8		Ouest	62	$E = -1.837 + 0.2118*D$	$24 < D < 312$	$\alpha = 0.051,$ $\beta = 0.000$
9	Centre urbain (enregistrements aux 15 minutes)	Nord	21	$E = -9.315 + 0.5943*D$	$0.25 < D < 168$	$\alpha = 11.433,$ $\beta = 0.109$
10		Est	8	$E = -19.829 + 0.9704*D$	$0.25 < D < 144$	$\alpha = 0.540,$ $\beta = 0.008$
11		Sud	41	$E = -11.181 + 0.5103*D$	$0.25 < D < 216$	$\alpha = 0.161,$ $\beta = 0.002$
12		Ouest	27	$E = -22.705 + 0.5963*D$	$0.25 < D < 168$	$\alpha = 0.421,$ $\beta = 0.005$



**Figure 4.31** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour diverses orientations de pente à partir de 1640 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans la municipalité d'Angra dos Reis. *Bleu* : Nord; *Vert* : Est; *Jaune* : Sud; *Rouge* : Ouest.

Les seuils  $ED$  établis dans le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 526 glissements de terrain et d'enregistrements pluviométriques journaliers indiquent qu'en deçà de 72 heures de précipitations, l'écart entre les valeurs seuils est minime selon l'orientation avec des valeurs qui varient entre 0 et 3,2 mm en 24 heures, entre 4,1 et 8,3 mm en 48 heures et entre 9,7 et 14,9 mm en 72 heures (fig. 4.32). Pour des épisodes dont la durée excède 72 heures, davantage de précipitations événementielles ( $E$ ) sont requises pour initier des glissements sur des pentes orientées au nord ( $E = -6.49 + 0.2977 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,210$ ) que sur des versants orientés à l'est ( $E = -6.929 + 0.2311 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,254$ ), au sud ( $E = -6.373 + 0.2411 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,178$ ) ou à l'ouest ( $E = -1.837 + 0.2118 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,175$ ). Effectivement, les pentes orientées au nord nécessitent plus de 22 mm en 96 heures, 43,5 mm en 168 heures, 50,6 mm en 192 heures, 72,1 mm en 264 heures et plus de 150,7 mm en 528 heures pour l'occurrence de glissements de terrain par comparaison à 15,2, 16,7 et 18,5 mm en 96 heures, 31,9, 34,1 et 33,7 mm en 168 heures, 37,4, 39,9 et 38,8 mm en 192 heures, 54,1, 57,2 et 54,1 mm en 264 heures et 115,1, 120,9 et 110 mm pour les versants orientés à l'est, au sud et à l'ouest. En somme, 113 glissements orientés au nord, 71 à l'est, 277 au sud et 62 à l'ouest ont été employées pour établir les différents seuils (tabl. 4.7). Les erreurs-types associées au paramètre  $\alpha$  sont plus élevées pour les versants

exposés à l'est et au nord (0,292 et 0,107) et plus faibles pour les versants exposés au sud et à l'ouest (0,083 et 0,051). Pour les erreurs-types liées au paramètre  $\beta$ , les valeurs sont de 0,001 pour les versants faisant face au nord, 0,002 à l'est, 0,001 à l'ouest et approximativement zéro pour les versants face au sud.

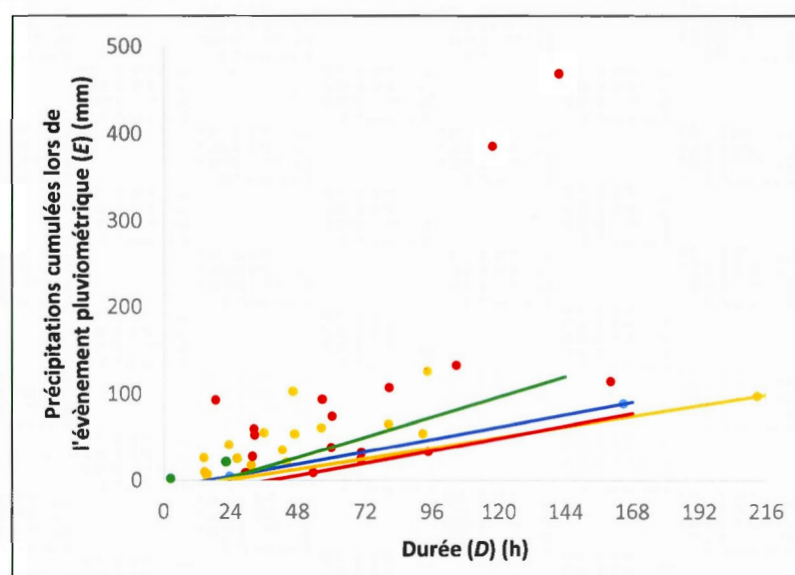


**Figure 4.32** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour diverses orientations de pente à partir de 526 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis. *Bleu* : Nord; *Vert* : Est; *Jaune* : Sud; *Rouge* : Ouest.

Les seuils  $ED$  établis dans le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 98 glissements de terrain et d'enregistrements pluviométriques réalisés aux 15 minutes révèlent que l'occurrence de glissements de terrain est peu probable pour des événements pluviométriques dont la durée ne dépasse pas 24 heures (38 heures pour les versants orientés à l'ouest). Pour les autres durées pluviométriques considérées ( $24 < D < 216$  heures), il est possible d'observer que ce sont les pentes orientées à l'est ( $E = -19,829 + 0,9704 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,364$ ) qui requièrent le plus de précipitations événementielles pour déclencher des glissements de terrain, suivit des versants au nord ( $E = -9,315 + 0,5943 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,249$ ), à l'ouest ( $E = -22,705 + 0,5963 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,312$ ) et au sud ( $E = -11,181 + 0,5103 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,191$ ) (fig. 4.34). Des valeurs de 26,7 mm en 48 heures, 73,3 mm en 96 heures, 119,9 mm en 144 heures et 189,7 mm en 216 heures sont requises sur les versants face à l'est par comparaison à des valeurs de 5,9, 13,3 et 19,2 mm en



48 heures, 34,5, 37,8 et 47,7 mm en 96 heures, 63,1, 62,2 et 76,2 mm en 144 heures et 106,1, 99 et 119 mm pour les versants face à l'ouest, au sud et au nord. En somme, 21 ruptures orientées vers le nord, 8 à l'est, 41 au sud et 27 à l'ouest ont été employées pour établir les différents seuils (tabl. 4.7). Les erreurs-types associées au paramètre  $\alpha$  sont particulièrement élevées pour les versants face au nord (11,433) et relativement faibles pour les versants exposés à l'est, au sud et à l'ouest (0,540, 0,161 et 0,421). Pour les erreurs-types liées au paramètre  $\beta$ , les valeurs sont de 0,109 pour les versants au nord, 0,008 pour les versants à l'est, 0,005 à l'ouest et 0,002 au sud.

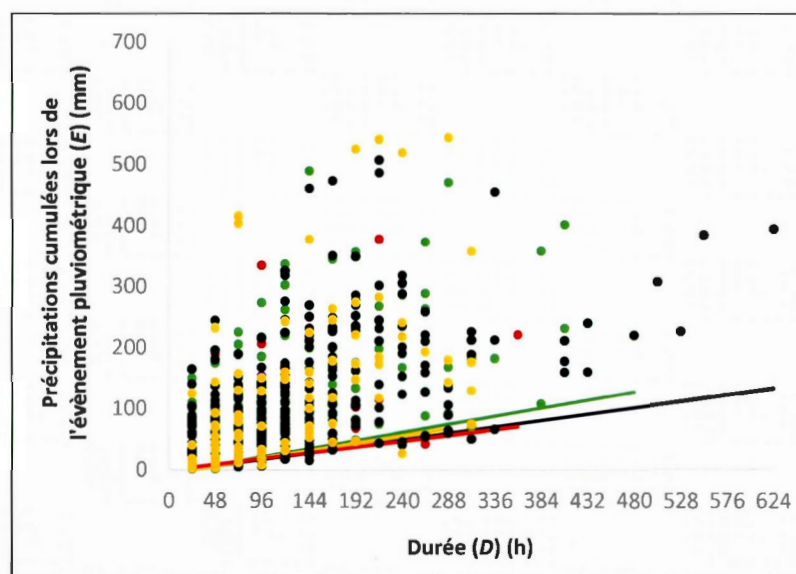


**Figure 4.33** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour diverses orientations de pente à partir de 98 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis. *Bleu* : Nord; *Vert* : Est; *Jaune* : Sud; *Rouge* : Ouest.

#### 4.3.4.4 Seuils $ED$ pour diverses occupations du sol

Les différents seuils  $ED$  établis en fonction des catégories d'occupation du sol (forêt, zone urbaine, pâturage et dune de sable) présentent dans la municipalité d'Angra dos Reis sont similaires pour des événements pluviométriques dont la durée est inférieure à 120 heures (5 jours) (fig. 4.35). Effectivement, des précipitations événementielles de 0,6 à 4,6 mm en 24 heures, 6,7 à 9,35 mm en 48 heures, 17,2 à 21,3 mm en 96 heures et de 22,5 à 27,9 mm

représentent les quantités minimales requises pour initier des glissements et ce, toutes catégories d'occupation du sol confondues. Pour des épisodes pluviométriques dont la durée excède cinq jours, l'écart entre les seuils est plus prononcé et des différences significatives peuvent être observées en termes de quantité de pluie requise pour déclencher des glissements. Ce sont les zones de forêt ( $E = -5.3 + 0.27708*D$ ;  $R^2 = 0,180$ ) qui requièrent le plus de précipitations ( $E$ ) pour initier des ruptures, soit 34,6 mm en 144 heures, 74,5 mm en 288 heures, 107,7 mm en 408 heures, 141 mm en 528 heures et environ 167,6 mm en 624 heures. Ensuite, ce sont les pâturages ( $E = -5.445 + 0.253*D$ ;  $R^2 = 0,178$ ) qui affichent les valeurs seuils les plus élevées, avec des valeurs de 30,9 mm 144 heures, 67,4 mm en 288 heures, 97,7 mm en 408 heures, 128,1 mm en 528 heures et 152,4 mm en 624 heures. Enfin, les zones urbaines ( $E = -3.833 + 0.2194*D$ ;  $R^2 = 0,166$ ) nécessitent des précipitations événementielles de 28 et 27,7 mm en 144 heures, 56,1 et 59,3 mm en 288 heures, 79,4 et 85,7 mm en 408 heures, 102,8 et 112 mm en 528 heures et 121,5 et 133,1 mm en 624 heures. En ce qui a trait aux erreurs-type associées à l'estimation des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  (tabl. 4.9), elles sont généralement faibles pour les zones urbaines (0,076 et 0,001), de forêt (0,190 et 0,001) et de pâturage (0,323, 0,002).



**Figure 4.34** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour diverses occupations du sol à partir de 1598 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans la municipalité d'Angra dos Reis. Noir : zone urbaine; Vert : forêt; Jaune : pâturage; Rouge : dune de sable.

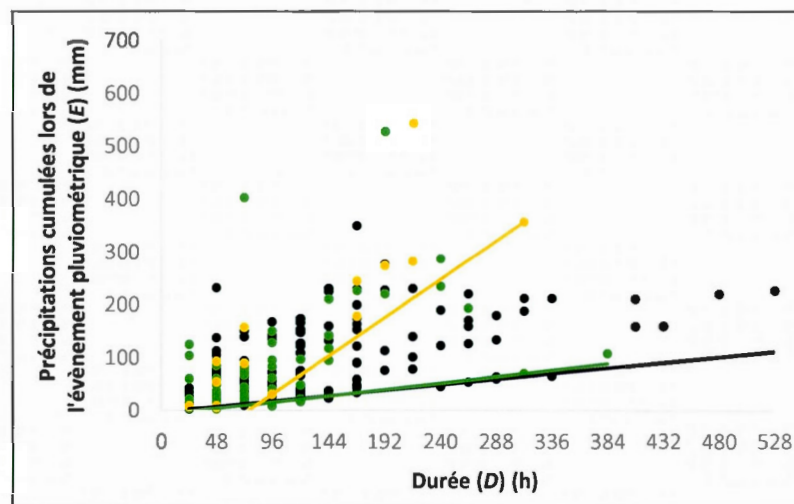
**Tableau 4.9**  
Seuils *ED* pour la possible occurrence de glissements de terrain établis pour  
diverses occupations du sol dans la municipalité d'Angra dos Reis

#	Échelle d'analyse	Type d'occupation du sol	Nombre de glissements	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Erreur-type
1	Municipalité d'Angra dos Reis	Zone urbaine	948	$E = -3.833 + 0.2194 * D$	$24 < D < 624$	$\alpha = 0,076,$ $\beta = 0,001$
2		Forêt	440	$E = -5.3 + 0.27708 * D$	$24 < D < 480$	$\alpha = 0,190,$ $\beta = 0,001$
3		Pâturage	135	$E = -5.445 + 0.253 * D$	$24 < D < 312$	$\alpha = 0.323,$ $\beta = 0.002$
4		Dune de sable	75	$E = 0.1947 * D$	$24 < D < 360$	$\alpha = 8.149,$ $\beta = 0.067$
5	Centre urbain (enregistrements journaliers)	Zone urbaine	399	$E = -3.21 + 0.21708 * D$	$24 < D < 528$	$\alpha = 0.010,$ $\beta = 0.000$
6		Forêt	92	$E = -8.48 + 0.253159 * D$	$24 < D < 384$	$\alpha = 0.252,$ $\beta = 0.002$
7		Pâturage	23	$E = -113,92 + 1,5085 * D$	$24 < D < 312$	$\alpha = 1.180,$ $\beta = 0.008$
8	Centre urbain (enregistrements aux 15 minutes)	Zone urbaine	69	$E = -11.181 + 0.5103 * D$	$0.25 < D < 216$	$\alpha = 0.514,$ $\beta = 0.005$
9		Forêt	12	$E = -31.765 + 1.575 * D$	$0.25 < D < 144$	$\alpha = 0.526,$ $\beta = 0.006$
10		Pâturage	12	$E = -176,944 + 2,9617 * D$	$0.25 < D < 144$	$\alpha = 9.356,$ $\beta = 0.111$

Des seuils *ED* ont été établis à l'échelle du centre urbain où le sol est essentiellement occupé par des forêts, des pâturages et des zones urbaines (fig. 4.35). D'abord, l'occurrence de glissements de terrain est très peu probable dans ces trois milieux lorsque les épisodes pluviométriques durent moins de 24 heures. Pour des précipitations d'une durée allant de 48 à 72 heures, des glissements ne sont pas attendus dans les zones de pâturage, alors que dans les milieux forestiers et urbains, des précipitations événementielles minimales de 3,6 et 7,2 mm en 48 heures et 9,7 et 12,4 mm sont requises. Pour des épisodes pluviométriques dont la durée excède 72 heures, ce sont les zones de pâturage ( $E = -113,92 + 1,5085 * D$ ;  $R^2 = 0,642$ ) qui nécessitent le plus de précipitations pour déclencher des glissements avec des valeurs de 30,9 mm en 96 heures, 103,1 mm en 144 heures et 356,7 mm en 312 heures. À ce chapitre, aucun glissement de terrain n'a été répertorié pour des précipitations durant plus de 312 heures (13 jours). Par comparaison aux pâturages pour des durées excédant 72 heures, des



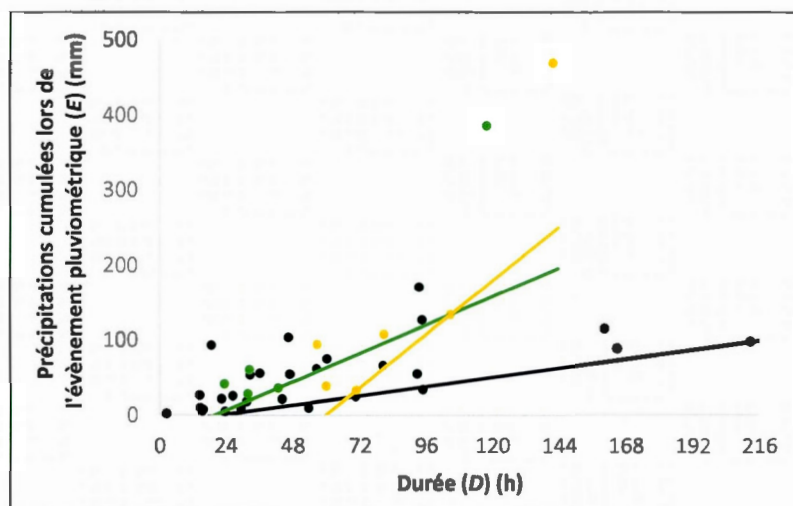
précipitations événementielles moindres sont requises pour déclencher des glissements de terrain en milieu urbain ( $E = -3.21 + 0.21708 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,182$ ) et forestier ( $E = -8.48 + 0.253159 \cdot D$ ;  $R^2 = 0,178$ ). En effet, des valeurs de  $E$  équivalant à 17,6 mm en 96 heures, 28 mm en 144 heures, 64,5 mm en 312 heures, 90,5 mm en 432 heures et 111,4 mm en 528 heures en zones urbaines, et de 15,8 mm en 96 heures, 27,9 mm en 144 heures, 70,5 mm en 312 heures, 100,8 mm en 432 heures et 125,1 mm en 528 heures en milieu forestier, représentent les quantités minimales pour initier des glissements dans le centre urbain d'Angra dos Reis. Les erreurs-types associées à l'estimation des paramètres empiriques  $\alpha$  et  $\beta$  affichent des valeurs moindres pour les zones urbaines (0,010 et 0,000) où ont été répertoriés 399 glissements entre janvier 2008 et mars 2013, des valeurs relativement plus élevées en milieu forestier (0,252 et 0,002) où se sont produit 92 glissements et des valeurs plus élevées en zone de pâturage (1,180 et 0,008) avec 23 glissements de terrain (tabl. 4.9).



**Figure 4.35** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour diverses occupations du sol à partir de 514 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis. Lignes : seuils minimums qui englobent 95 % des données. Noir : zone urbaine; Vert : forêt; Jaune : pâturage.

Les précipitations événementielles ( $E$ ) enregistrées aux 15 minutes et la durée des épisodes pluviométriques ( $D$ ) associées à 69 glissements de terrain déclenchés en milieu urbain, 12 en milieu forestier et 12 en zone de pâturage ont permis l'établissement de seuils  $ED$  pour le centre urbain d'Angra dos Reis (tabl. 4.9). Parmi les seuils proposés (fig. 4.36), un minimum de 24

heures de précipitations semble requis pour initier des glissements en milieu urbain et forestier, tandis qu'en zone de pâturage, les épisodes pluviométriques doivent durer un minimum de 72 heures. De manière générale, ce sont les zones urbaines qui nécessitent le moins de précipitations événementielles pour initier des ruptures avec des valeurs seuils de 1 mm en 24 heures, 13,3 mm en 48 heures, 37,8 mm en 96 heures, 62,3 mm en 144 heures et 99 mm en 216 heures. En revanche, les valeurs seuils associées aux forêts et pâturage sont significativement plus élevées et ce, particulièrement pour les événements dont la durée excède 96 heures. Les milieux forestiers affichent des valeurs seuils supérieures pour des durées pluviométriques inférieures à 96 heures alors que les zones de pâturages ont des valeurs de  $E$  plus élevées pour des épisodes dont la durée excède 96 heures. Les valeurs seuils sont de 6 mm en 24 heures, 43,8 mm en 48 heures, 119,5 mm en 96 heures, 195,1 mm en 144 heures et 308,6 mm en 216 heures pour les forêts, alors que pour les pâturages on note des valeurs de 36,3 mm en 72 heures, 107,3 mm en 96 heures, 249,5 mm en 144 heures et 462,7 mm en 216 heures de précipitations. Les erreurs-types associées au paramètre  $\alpha$  sont plus élevées pour les zones de pâturage (9,356) et plus faibles pour les zones urbaines (0,514) et forestières (0,526). Les erreurs-types liées au paramètre  $\beta$  montrent les mêmes tendances avec des valeurs supérieures pour les pâturages (0,111) et moindres pour les milieux urbains (0,005) et forestiers (0,006).



**Figure 4.36** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour diverses occupations du sol à partir de 93 glissements de terrain déclenchés par les précipitations entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis. *Noir* : zone urbaine; *Vert* : forêt; *Jaune* : pâturage.

#### 4.3.5 Seuils basés sur les précipitations antécédentes

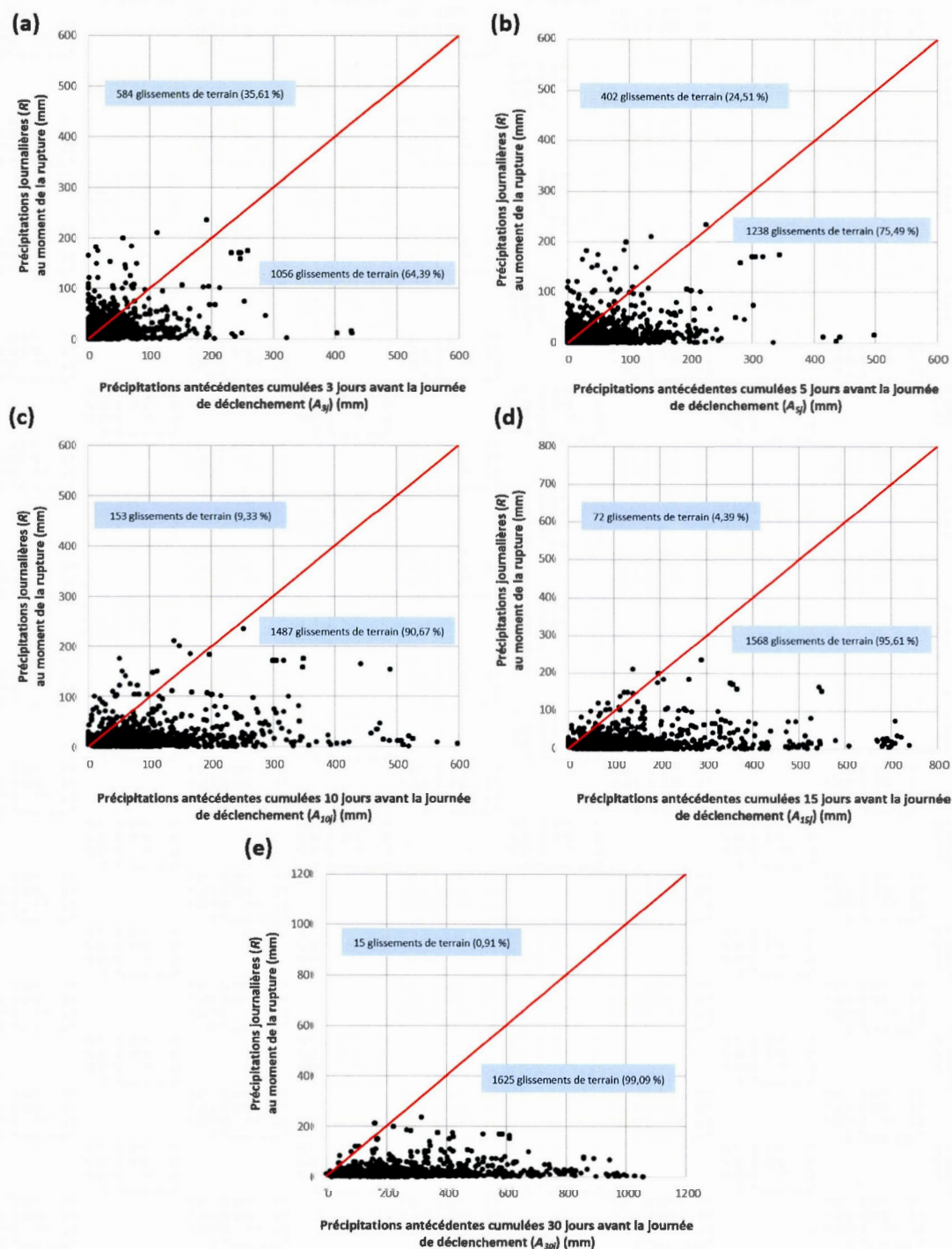
##### 4.3.5.1 À l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis

Les précipitations de forte intensité et courte durée sont fréquentes dans la municipalité d'Angra dos Reis et mènent régulièrement à des glissements de terrain suite au développement rapide de pressions hydrauliques lié à l'infiltration de l'eau dans le sol. En contrepartie, il est possible que certains glissements résultent d'une saturation lente et progressive du sol associée à des précipitations antécédentes ayant un effet probant sur la nappe phréatique et le niveau d'humidité (Govi et Sorzana, 1980; Wieczorek, 1996). Afin d'évaluer si les conditions d'humidité antécédentes prédisposent certains versants à des décrochements, les précipitations journalières au moment de la rupture ( $R$ ) ainsi que les précipitations antécédentes cumulées sur 3, 5, 10, 15 et 30 jours avant la journée de déclenchement ( $A_{(j)}$ ) ont été mises en relation pour les 1640 glissements répertoriés dans la municipalité d'Angra dos Reis (fig. 4.37).

De manière générale, il semble que les précipitations antécédentes prédisposent bel et bien les versants à des décrochements. Au moment de la rupture, les précipitations antécédentes se sont avérées plus élevées que les précipitations journalières pour l'ensemble des périodes antécédentes considérées et pour la majorité des 1640 glissements analysés (fig. 4.37a-e). Lorsqu'analysés en fonction des précipitations cumulées trois jours avant la journée de déclenchement (fig. 4.37a), 35,61 % des glissements (584 sur 1640) sont influencés par les précipitations journalières et 64,39 % (1056 sur 1640) sont influencés par les précipitations antécédentes. L'écart est encore plus marqué pour les autres périodes analysées (fig. 4.37b-e) avec des précipitations antécédentes surpassant les précipitations journalières dans 75,49 %, 90,67 %, 95,61 % et 99,09 % des cas, pour des périodes antécédentes respectives de 5, 10, 15 et 30 jours. En d'autres mots, des 1640 glissements considérés, seulement 35,61 % ont eu lieu sous l'influence des précipitations journalières relativement aux précipitations antécédentes cumulées sur trois jours, un effet qui diminue à 24,51 %, 9,33 %, 4,39 % et 0,91 % pour des périodes antécédentes respectives de 5, 10, 15 et 30 jours.

Étant donné que les précipitations antécédentes semblent bel et bien jouer un rôle dans le déclenchement des glissements de terrain à l'échelle de la municipalité d'Angra dos Reis, il





**Figure 4.37** Relation entre les précipitations antécédentes cumulées (3, 5, 10, 15 et 30 jours) avant la journée de déclenchement et les précipitations journalières au moment de la rupture pour 1640 glissements de terrain survenus entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans la municipalité d'Angra dos Reis.

convient maintenant d'identifier le nombre spécifique de jours influençant le plus l'occurrence des glissements. Pour ce faire, une régression logistique a été effectuée sur cinq paires de variables indépendantes différentes associées aux 1640 glissements et aux 950 événements pluviométriques n'ayant pas initié de ruptures durant la période d'étude (tabl. 4.10). Les critères d'Akaike (AIC) associés aux différents modèles logistiques indiquent que ce sont les précipitations journalières au moment de la rupture ( $R$ ) couplées aux précipitations antécédentes cumulées 15 jours avant la journée de déclenchement ( $A_{(15j)}$ ) qui permettent une meilleure prédiction de l'occurrence des glissements. Ce modèle logistique semble capable de prédire l'occurrence des glissements avec une fiabilité de 52,93 % (868 sur 1640) et la non-occurrence avec une fiabilité de 77,05 % (732 sur 950), pour une capacité prédictive globale de 61,78 %. Ceci surpasse très légèrement la capacité prédictive des autres modèles qui varie entre 58,92 % ( $A_{(3j)}$ ) et 61,27 % ( $A_{(30j)}$ ).

**Tableau 4.10**  
Classification sommaire des modèles logistiques pour les différents groupes  
de paramètres considérés à l'échelle de la municipalité d'Angra dos Reis

#	Groupes de paramètres	Point de coupure	AIC		Prédiction			% correct
					Glissement de terrain			
					0	1		
1	R et A <sub>3j</sub>	0.63	3163.0	Glissement de terrain	0	722	228	76.00
					1	836	804	49.02
				Pourcentage global				58.92
				2	R et A <sub>5j</sub>	0.63	3147.5	Glissement de terrain
1	804	836	50.98					
Pourcentage global								60.23
3	R et A <sub>10j</sub>	0.63	3131.8					Glissement de terrain
				1	789	851	51.89	
				Pourcentage global				60.81
				4	R et A <sub>15j</sub>	0.63	3109.3	Glissement de terrain
1	772	868	52.93					
Pourcentage global								61.78
5	R et A <sub>30j</sub>	0.63	3135.3					Glissement de terrain
				1	770	870	53.05	
				Pourcentage global				61.27

L'équation dérivée à partir de la constante ( $\alpha$ ) et des coefficients ( $\beta$ ) associés à la paire de variables indépendantes retenue et intégrée à la fonction logistique  $f(z)$  correspond à :

$$z = -0.40066 + 0.01207 * R + 0.00506 * A_{15j} \quad (13)$$

où la valeur de la constante est de -0,40066 et les coefficients des variables indépendantes sont de 0,01207 pour  $R$  et 0,00506 pour  $A_{(15j)}$  (tabl. 4.11).

D'une part, le modèle est jugé significatif en raison de la valeur  $p$  ( $<0,0001$ ) comme quoi au moins une des deux variables contribue au déclenchement des glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis. D'autre part, les valeurs  $p$  associées à  $R$  et  $A_{(15j)}$  indiquent que les deux variables influencent bel et bien l'occurrence des glissements. Les valeurs exponentielles des variables prédictives ( $\text{Exp}(\beta)$ ; tabl. 4.11) montrent que  $R$  représente la variable la plus significative avec une valeur de 1,01214 par comparaison à 1,00507 pour  $A_{(15j)}$ . Cela signifie qu'une augmentation d'un millimètre de précipitations journalières peut accroître la probabilité de rupture de 0,6 % en fonction d'une probabilité initiale de 0,63 (tabl. 4.10). En revanche, l'exposant de 1,00507 associé  $A_{(15j)}$  suggère une croissance de 0,25 % dans les probabilités d'occurrences pour une augmentation d'un millimètre de pluie durant les 15 jours préalables à la journée de déclenchement.

**Tableau 4.11**

Résultats de l'analyse par régression logistique pour la paire de variables ( $R$  et  $A_{15j}$ )  
la plus significative dans le déclenchement de glissements de terrain  
à l'échelle de la municipalité d'Angra dos Reis

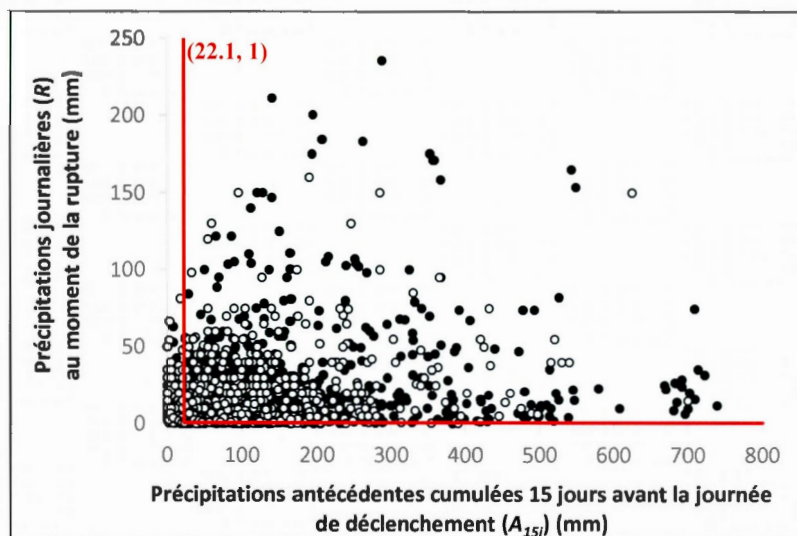
Paramètres ( $X_i$ )	Coefficient ( $\beta$ )	Erreur-type	Signification	Exposant ( $\beta$ )
$R$	0.01207	0.00190	$< 0.0001$	1.01214
$A_{15j}$	0.00506	0.00043	$< 0.0001$	1.00507
Constante ( $\alpha$ )	-0.40066	0.13192	0.00239	0.66987

Probabilité initiale de rupture de 0.63

Conformément à la paire de variables identifiées comme la plus influente dans le déclenchement des glissements, un seuil minimum englobant 95 % des données a été établi pour  $R$  et  $A_{(15j)}$  (fig. 4.38). Le seuil pluviométrique associé aux précipitations cumulées 15 jours



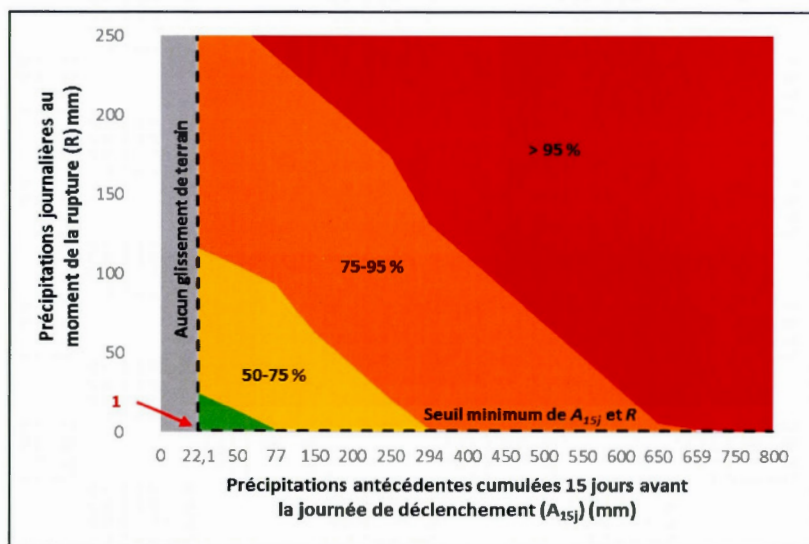
avant le déclenchement des glissements de terrain équivaut à 22,1 mm, alors que celui lié aux précipitations journalières au moment de la rupture correspond à un millimètre. Ces seuils représentent les valeurs minimales requises pour initier des glissements de terrain à l'échelle régionale. Les sols de la région doivent donc avoir reçu minimalement 22,1 mm de précipitations antécédentes 15 jours avant la journée d'occurrence et un millimètre de pluie lors de la journée de d'occurrence pour que des glissements se produisent.



**Figure 4.38** Seuil minimum (5 %) basé sur les précipitations antécédentes cumulées 15 jours avant la journée de déclenchement et établi pour la municipalité d'Angra dos Reis à partir de 1640 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique et 950 événements pluviométriques n'ayant pas déclenchés de glissements de terrain (cercles blancs) entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.

En fonction du modèle logistique dérivé pour la municipalité d'Angra dos Reis (équation 13), des probabilités d'occurrences ont pu être calculées pour différentes valeurs anticipées de  $R$  et  $A_{(15j)}$  se situant au-dessus des valeurs seuils identifiées. Les valeurs dégagées (fig. 4.39) montrent que des glissements de terrain ont une probabilité d'occurrence variant entre 43,1 et 50 % pour des précipitations journalières cumulant entre un et 24 mm et des précipitations antécédentes sur 15 jours de 22,1 mm, entre un et 13 mm pour 50 mm de précipitations antécédentes et un millimètre de pluie pour 77 mm de  $A_{(15j)}$ . La capacité prédictive du modèle se situe entre 50 et 75 % pour des mesures de  $R$  entre 20 et 115 mm et une valeur de  $A_{(15j)}$  de

22,1 mm, entre un et 92 mm pour 77 mm de  $A_{(15j)}$ , entre un et 41 mm pour 200 mm antécédents et un millimètre pour 294 mm de  $A_{(15j)}$ . Pour une fiabilité de 75 à 95 %, des précipitations journalières entre 115 et 268 mm pour 22,1 mm de précipitations antécédentes sur 15 jours, entre 92 et 236 mm pour 77 mm de  $A_{(15j)}$ , entre 41 et 194 mm pour 200 mm antécédents, entre un et 89 mm pour 450 mm de  $A_{(15j)}$  et un millimètre de pluie pour 659 mm de  $A_{(15j)}$  doivent être cumulées. Enfin, les probabilités d'occurrences des glissements de terrain sont très élevées (>95 %) si les précipitations journalières dépassent 268 mm pour 22,1 mm de  $A_{(15j)}$ , 236 mm pour 77 mm antécédents, 194 mm pour 200 mm de précipitations antécédentes, 89 mm pour 450 mm de  $A_{(15j)}$  et un millimètre pour un minimum 659 mm de précipitations cumulées sur 15 jours avant la journée d'occurrence du glissement. Ainsi, un minimum de 290,1 mm de pluie doit être accumulé sur une période de 16 jours (15 jours antécédents + la journée d'occurrence) pour que des glissements de terrain se produisent avec une quasi-certitude (>95 %).



**Figure 4.39** Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis en fonction des variables  $R$  et  $A_{15j}$ . Les probabilités ont été établies à partir de 1640 glissements initiés lors d'événements pluviométriques et 950 événements non-déclencheurs répertoriés entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. Rouge : probabilité d'occurrence >95 %; Orange : probabilité d'occurrence entre 75 et 95 %; Jaune : probabilité d'occurrence entre 50 et 75 %; Vert : probabilité d'occurrence entre 43,1 et 50 %; Gris : probabilité d'occurrence  $\approx$  0 %; Ligne pointillée : seuil minimum (5 %) associé à  $R$  (1 mm) et à  $A_{15j}$  (22,1 mm).

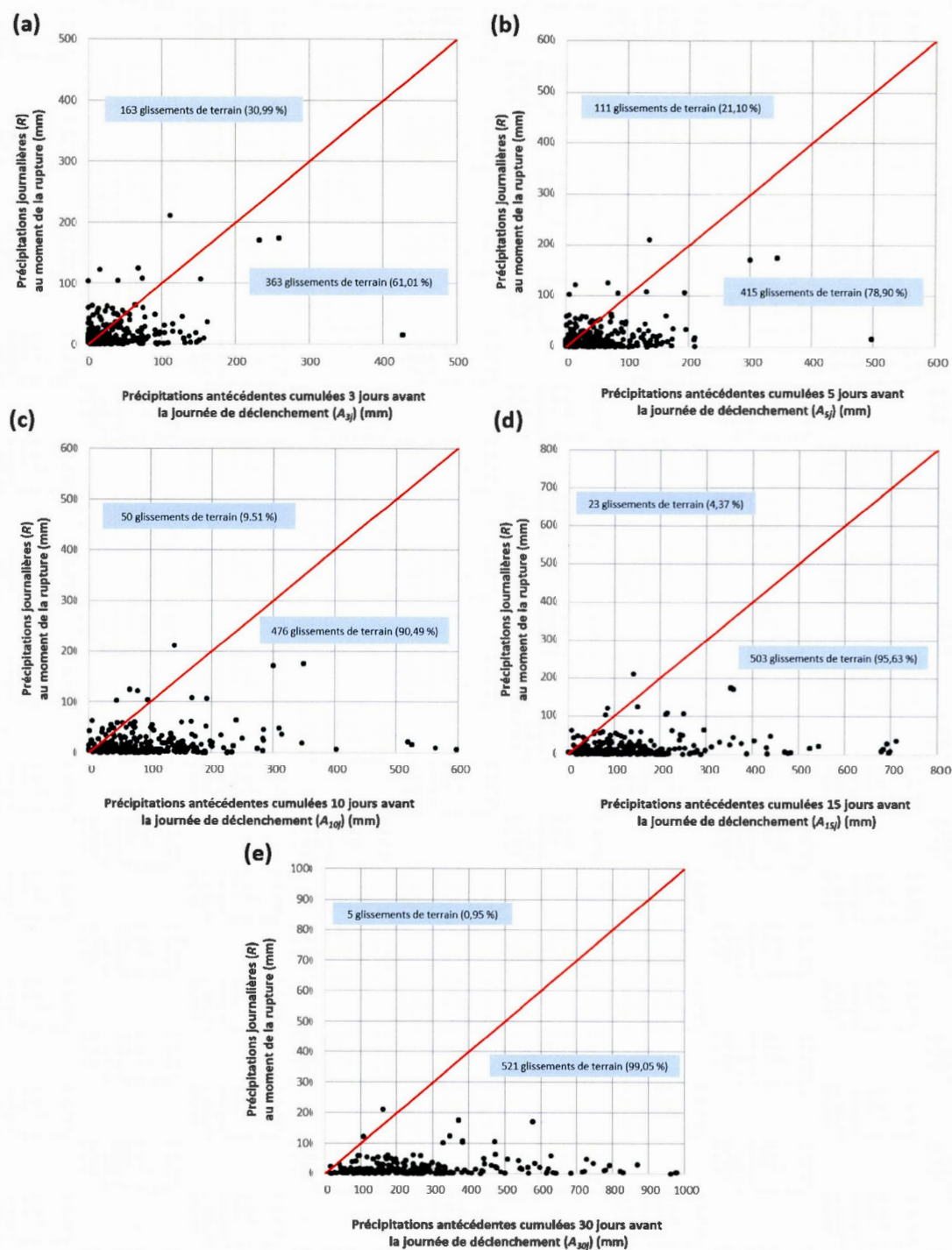
#### 4.3.5.2 À l'échelle locale du centre urbain – enregistrements journaliers

Le rôle des conditions d'humidité antécédentes dans la déstabilisation de certains versants a été évalué en associant les précipitations journalières au moment de la rupture ( $R$ ) aux précipitations antécédentes cumulées 3, 5, 10, 15 et 30 jours avant la journée de déclenchement ( $A_{(j)}$ ) pour les 526 glissements répertoriés dans le centre urbain d'Angra dos Reis (fig. 4.40).

De manière générale, les précipitations antécédentes semblent bel et bien prédisposer les versants à des mouvements gravitaires à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis. En effet, pour la majorité des ruptures analysées, davantage de pluie a été cumulée de trois à 30 jours avant la journée d'occurrence par comparaison aux précipitations journalières (fig. 4.40a-e). Pour les précipitations cumulées trois jours avant la journée d'occurrence des glissements (fig. 4.40a), ce sont 30,99 % des cas (163 sur 526) qui ont été influencés davantage par les précipitations journalières par comparaison à 61,01 % (363 sur 526) pour les précipitations antécédentes. L'écart entre les pourcentages tend à s'accroître en fonction d'un allongement des périodes antécédentes considérées (fig. 4.40b-e). Ainsi, les précipitations antécédentes au moment des ruptures ont surpassé les précipitations journalières dans 78,9 %, 90,67 %, 95,61 % et 99,09 % des cas, pour des périodes antécédentes respectives de 5, 10, 15 et 30 jours. En d'autres mots, des 526 glissements considérés, seulement 30,99 % sont survenus sous l'influence des précipitations journalières relativement aux précipitations antécédentes cumulées sur trois jours, un effet qui diminue à 21,10 %, 9,51 %, 4,37 % et 0,95 % pour des périodes antécédentes respectives de 5, 10, 15 et 30 jours.

Les précipitations antécédentes influencent donc l'occurrence des glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis. De manière à cerner la période antécédente qui influe le plus sur l'occurrence des glissements, une régression logistique a été réalisée sur cinq paires de variables indépendantes distinctes associées aux 526 glissements déclenchés et aux 105 épisodes pluviométriques n'ayant pas initié de rupture durant la période d'étude considérée (tabl. 4.12). Les critères d'Akaike (AIC) associés aux différents modèles logistiques générés indiquent que ce sont les précipitations journalières au moment de la rupture ( $R$ ) couplée aux précipitations antécédentes cumulées 15 jours avant la journée de déclenchement ( $A_{(15j)}$ ) qui permettent une meilleure prédiction de l'occurrence des glissements. Ce modèle logistique





**Figure 4.40** Relation entre les précipitations antécédentes cumulées (3, 5, 10, 15 et 30 jours) avant la journée de déclenchement et les précipitations journalières au moment de la rupture pour 526 glissements de terrain survenus entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.

semble capable de prédire l'occurrence des glissements avec une fiabilité de 63,50 % (334 sur 526) et la non-occurrence avec une fiabilité de 83.81 % (88 sur 105), pour une capacité prédictive globale de 66,88 %. Malgré une valeur AIC de 459 qui est inférieure à tous les autres, c'est le modèle employant 5 jours de précipitations antécédentes qui possèdent la capacité prédictive la plus élevée. Néanmoins, c'est le modèle logistique employant les précipitations journalières et les précipitations antécédentes cumulées sur 15 jours qui est privilégié en raison de son plus faible AIC, signifiant qu'il est le modèle le mieux ajusté aux données. En d'autres mots, le modèle couplant R et  $A_{(15j)}$  est celui ayant la plus petite perte d'information attendue lorsque les estimations du maximum de vraisemblance substituent les vraies valeurs paramétriques dans le modèle.

**Tableau 4.12**  
Classification sommaire des modèles logistiques pour les différents  
groupes de paramètres considérés à l'échelle du centre urbain  
d'Angra dos Reis (enregistrements journaliers)

#	Groupes de paramètres	Point de coupure	AIC		Prédiction			% correct			
					Glissement de terrain						
					0	1					
1	R et A <sub>3j</sub>	0.83	470.7	Glissement de terrain	0	84	21	80.00			
					1	197	329	62.55			
				Pourcentage global							65.45
				2	R et A <sub>5j</sub>	0.83	473.8	Glissement de terrain	0	91	14
1	189	337	64.07								
Pourcentage global								67.83			
3	R et A <sub>10j</sub>	0.83	463.1					Glissement de terrain	0	90	15
				1	196	330	62.74				
				Pourcentage global							66.56
				4	R et A <sub>15j</sub>	0.83	459.0	Glissement de terrain	0	88	17
1	192	334	63.50								
Pourcentage global								66.88			
5	R et A <sub>30j</sub>	0.83	463.2					Glissement de terrain	0	89	16
				1	203	323	61.41				
				Pourcentage global							65.29

L'équation dérivée à partir de la constante ( $\alpha$ ) et des coefficients ( $\beta$ ) associés à la paire de variables indépendantes retenue et intégrée à la fonction logistique  $f(z)$  correspond à :

$$z = -2.1973 + 0.07498 * R + 0.00942 * A_{15j} \quad (14)$$

où la valeur de la constante est de -0,21973 et les coefficients des variables indépendantes sont de 0,07498 pour  $R$  et 0,00942 pour  $A_{(15j)}$  (tabl. 4.13).

D'une part, le modèle est significatif en raison de la valeur  $p$  ( $<0,0001$ ) comme quoi au moins une des deux variables contribue au déclenchement des glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis. D'autre part, les valeurs  $p$  associées à  $R$  et  $A_{(15j)}$  indiquent que les deux variables influencent bel et bien l'occurrence des glissements. Les valeurs exponentielles des variables prédictives ( $\text{Exp}(\beta)$ ; tabl. 4.13) montrent que  $R$  représente la variable la plus significative avec une valeur de 1,07786 par comparaison à 1,00946 pour  $A_{(15j)}$ . Cela signifie qu'une augmentation d'un millimètre de précipitations journalières peut accroître la probabilité de rupture de 3,74 % en fonction d'une probabilité initiale de 0,83 (tabl. 4.12). En revanche, l'exposant de 1,00946 associé à  $A_{(15j)}$  suggère une croissance de 0,47 % dans les probabilités d'occurrences pour une augmentation d'un millimètre de pluie durant les 15 jours préalables à la journée de déclenchement.

**Tableau 4.13**

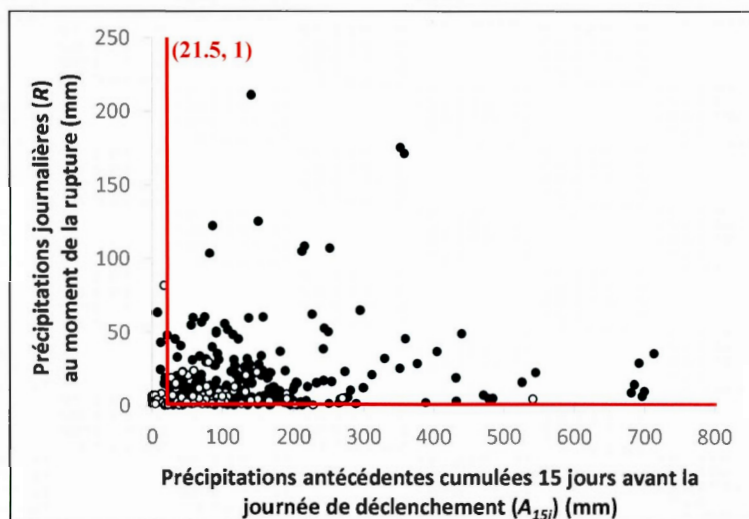
Résultats de l'analyse par régression logistique pour la paire de variables ( $R$  et  $A_{15j}$ ) la plus significative dans le déclenchement de glissements de terrain à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis (enregistrements journaliers)

Paramètres ( $X_i$ )	Coefficient ( $\beta$ )	Erreur-type	Signification	Exposant ( $\beta$ )
$R$	0.07498	0.01539	$< 0.0001$	1.07786
$A_{15j}$	0.00942	0.00183	$< 0.0001$	1.00946
Constante ( $\alpha$ )	-0.21973	0.13522	0.71308	0.80273

Probabilité initiale de rupture de 0.83



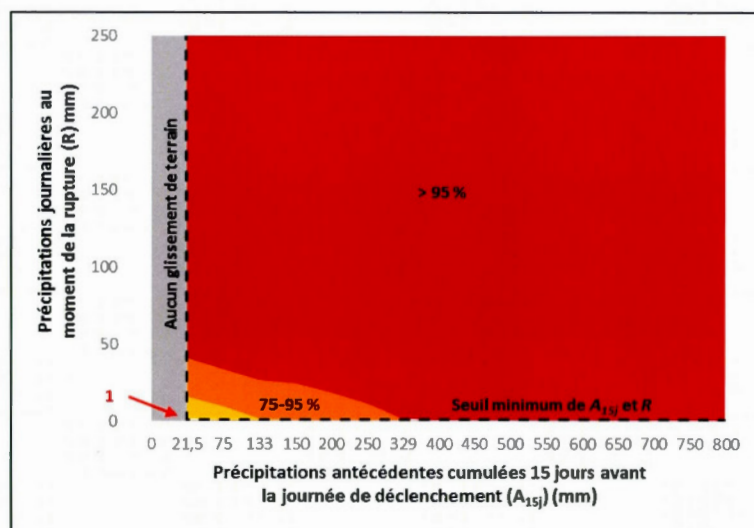
En lien avec la paire de variables identifiée comme la plus influente dans le déclenchement des glissements, un seuil minimum englobant 95 % des données a été établi pour  $R$  et  $A_{(15j)}$  (fig. 4.41). Le seuil pluviométrique associé aux précipitations cumulées 15 jours avant le déclenchement des glissements de terrain équivaut à 21,5 mm, alors que celui lié aux précipitations journalières au moment de la rupture correspond à un millimètre. Ces seuils représentent les valeurs minimales requises pour initier de glissements de terrain à l'échelle locale. Ainsi, les sols du centre urbain doivent avoir reçu un minimum de 21,5 mm de précipitations antécédentes 15 jours avant la journée d'occurrence et un millimètre de pluie lors de la journée d'occurrence pour que des glissements se produisent.



**Figure 4.41** Seuil minimum (5 %) basé sur les précipitations antécédentes cumulées 15 jours avant la journée de déclenchement et établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 526 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique et 105 événements pluviométriques n'ayant pas déclenchés de glissements de terrain (cercles blancs) entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013.

Conformément au modèle logistique dérivé pour la municipalité d'Angra dos Reis (équation 14), des probabilités d'occurrences ont pu être calculées pour différentes valeurs anticipées de  $R$  et  $A_{(15j)}$  se situant au-dessus des valeurs seuils identifiées. Les probabilités dégagées (fig. 4.42) indiquent que pour des valeurs de  $R$  supérieures à un millimètre et des valeurs de  $A_{(15j)}$  plus élevées que 21,5 mm, le modèle prédit des glissements de terrain avec une fiabilité minimale de 51,4 %. De la sorte, des précipitations journalières de un à 15 mm pour

21,5 mm de précipitations antécédentes cumulées sur 15 jours avant la journée de déclenchement, de un à 9 mm pour 75 mm de  $A_{(15j)}$  et un millimètre pour 133 mm antécédents sont associées à une capacité prédictive de 51,6 à 75 %. Pour une fiabilité de 75 à 95 %, des précipitations journalières entre 15 et 40 mm pour 21,5 mm de précipitations antécédentes sur 15 jours, entre 9 et 33 mm pour 75 mm de  $A_{(15j)}$ , entre un et 26 mm pour 133 mm antécédents, entre un et 18 mm pour 200 mm de  $A_{(15j)}$  et un millimètre de pluie pour 329 mm de  $A_{(15j)}$  doivent être cumulées. Enfin, des glissements de terrain ont une très forte probabilité de se produire (>95 %) si les valeurs de  $R$  dépassent 40 mm pour 21,5 mm de  $A_{(15j)}$ , 33 mm pour 75 mm antécédents, 26 mm pour 128 mm de précipitations antécédentes, 18 mm pour 200 mm de  $A_{(15j)}$  et plus d'un millimètre pour au moins 329 mm de précipitations cumulées sur 15 jours avant la journée d'occurrence du glissement. De la sorte, un minimum de 61,5 mm de pluie doit être accumulé sur une période de 16 jours (15 jours antécédents + la journée d'occurrence) pour que des glissements de terrain se produisent avec une quasi-certitude (>95 %).



**Figure 4.42** Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis en fonction des variables  $R$  et  $A_{15j}$ . Les probabilités ont été établies à partir de 526 glissements initiés lors d'événements pluviométriques et 105 événements non-déclencheurs répertoriés entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. *Rouge* : probabilité d'occurrence >95 %; *Orange* : probabilité d'occurrence entre 75 et 95 %; *Jaune* : probabilité d'occurrence entre 51,4 et 75 %; *Gris* : probabilité d'occurrence  $\approx$  0 %; Ligne pointillée : seuil minimum (5 %) associé à  $R$  (1 mm) et à  $A_{15j}$  (21,5 mm).

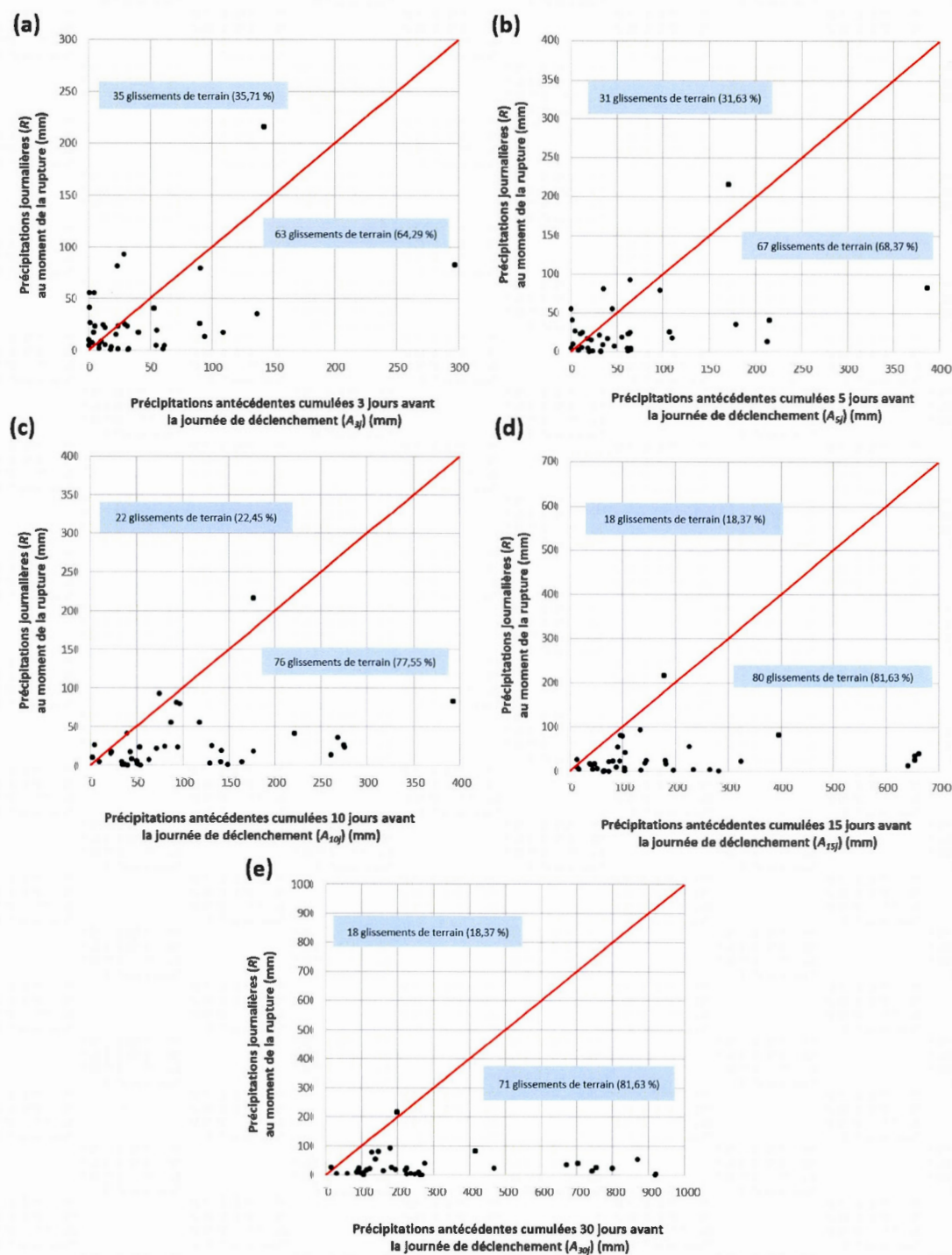
#### 4.3.5.3 À l'échelle locale du centre urbain – enregistrements aux 15 minutes

Le rôle des précipitations antécédentes dans la déstabilisation de certains versants a été évalué en comparant les précipitations journalières au moment de la rupture ( $R$ ) aux précipitations antécédentes cumulées 3, 5, 10, 15 et 30 jours avant la journée de déclenchement ( $A_{(j)}$ ) pour les 98 glissements répertoriés dans le centre urbain d'Angra dos Reis (fig. 4.43).

Les précipitations antécédentes semblent prédisposer les sols à des ruptures dans le centre urbain d'Angra dos Reis. Au moment de la rupture, les précipitations antécédentes se sont avérées plus élevées que les précipitations journalières pour l'ensemble des périodes antécédentes considérées et pour la majorité des 98 glissements analysés (fig. 4.43a-e). Lorsqu'analysés en fonction des précipitations cumulées trois jours avant la journée de déclenchement (fig. 4.43a), 35,71 % des glissements de terrain (35 sur 98) sont davantage influencés par les précipitations journalières et 64,29 % (63 sur 98) sont influencés par les précipitations antécédentes. L'écart est encore plus marqué pour les autres périodes analysées (fig. 4.43b-e), avec des précipitations antécédentes surpassant les précipitations journalières dans 68,37 %, 77,55 %, 81,63 % et 81,63 % des cas, pour des périodes antécédentes respectives de 5, 10, 15 et 30 jours. En d'autres mots, des 98 glissements considérés, seulement 35,71 % sont survenus sous l'influence des précipitations journalières relativement aux précipitations antécédentes cumulées sur trois jours, un effet qui diminue à 31,63 %, 22,45 %, 18,37 % et 18,37 % pour des périodes antécédentes respectives de 5, 10, 15 et 30 jours.

Les précipitations antécédentes influencent donc l'occurrence des glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis. De manière à cerner la période antécédente qui influe le plus sur l'occurrence des ruptures, une régression logistique a été réalisée sur cinq paires de variables indépendantes distinctes associées aux 98 glissements déclenchés et aux 100 épisodes pluviométriques n'ayant pas initié de rupture durant la période d'étude considérée (tabl. 4.14). Les critères d'Akaike (AIC) associés aux différents modèles logistiques générés indiquent que ce sont les précipitations journalières au moment de la rupture ( $R$ ) couplée aux précipitations antécédentes cumulées 30 jours avant la journée de déclenchement ( $A_{(30j)}$ ) qui permettent une meilleure prédiction de l'occurrence des glissements. Ce modèle logistique semble capable de prédire l'occurrence des glissements avec une fiabilité de 65,31 % (64 sur 98) et la non-





**Figure 4.43** Relation entre les précipitations antécédentes cumulées (3, 5, 10, 15 et 30 jours) avant la journée de déclenchement et les précipitations journalières au moment de la rupture pour 98 glissements de terrain survenus entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013 dans le centre urbain d'Angra dos Reis.

occurrence avec une fiabilité de 88 % (88 sur 105), pour une capacité prédictive globale de 76,77 %. Malgré une valeur AIC de 184,3 qui est inférieure à tous les autres modèles et similaire à celle de 184,8 obtenue par le modèle jumelant  $R$  et  $A_{(15j)}$ , c'est le modèle employant 10 jours de précipitations antécédentes qui possèdent la capacité prédictive la plus élevée, suivit de  $A_{(15j)}$  et  $A_{(5j)}$ . Néanmoins, c'est le modèle logistique employant les précipitations journalières et les précipitations antécédentes cumulées sur 30 jours qui est privilégié en raison de son plus faible AIC, signifiant qu'il est le modèle le mieux ajusté aux données. En d'autres mots, le modèle couplant  $R$  et  $A_{(30j)}$  est celui ayant la plus petite perte d'information attendue lorsque les estimations du maximum de vraisemblance substituent les vraies valeurs paramétriques dans le modèle.

**Tableau 4.14**  
Classification sommaire des modèles logistiques pour les différents groupes de paramètres considérés à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis (enregistrements aux 15 minutes)

#	Groupes de paramètres	Point de coupure	AIC		Prédiction			% correct
					Glissement de terrain			
					0	1		
1	R et A <sub>3j</sub>	0.49	194.6	Glissement de terrain	0	88	12	88.00
					1	35	63	64.29
				Pourcentage global				
2	R et A <sub>5j</sub>	0.49	190.3	Glissement de terrain	0	91	9	91.00
					1	35	63	64.29
				Pourcentage global				
3	R et A <sub>10j</sub>	0.49	193.6	Glissement de terrain	0	91	9	91.00
					1	30	68	69.39
				Pourcentage global				
4	R et A <sub>15j</sub>	0.49	184.8	Glissement de terrain	0	90	10	90.00
					1	32	66	67.35
				Pourcentage global				
5	R et A <sub>30j</sub>	0.49	184.3	Glissement de terrain	0	88	12	88.00
					1	34	64	65.31
				Pourcentage global				

L'équation dérivée à partir de la constante ( $\alpha$ ) et des coefficients ( $\beta$ ) associés à la paire de variables indépendantes retenue et intégrée à la fonction logistique  $f(z)$  correspond à :

$$z = -2.04653 + 0.02503 * R + 0.00567 * A_{30j} \quad (15)$$

où la valeur de la constante est de -2,04653 et les coefficients des variables indépendantes sont de 0,02503 pour  $R$  et 0,00567 pour  $A_{(30j)}$  (tabl. 4.15).

D'une part, le modèle est significatif en raison de la valeur  $p$  ( $<0,0001$ ) comme quoi au moins une des deux variables contribue au déclenchement des glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis. D'autre part, les valeurs  $p$  associées à  $R$  et  $A_{(30j)}$  indiquent que les deux variables influencent bel et bien l'occurrence des glissements. Les valeurs exponentielles des variables prédictives ( $\text{Exp}(\beta)$ ; tabl. 4.15) montrent que  $R$  représente la variable la plus significative avec une valeur de 1,02535 par comparaison à 1,00569 pour  $A_{(30j)}$ . Ceci signifie qu'une augmentation d'un millimètre de précipitations journalières peut accroître la probabilité de rupture de 1,25 % en fonction d'une probabilité initiale de 0,49 (tabl. 4.14). En revanche, l'exposant de 1,00569 associé à  $A_{(30j)}$  suggère une croissance de 0,28 % dans les probabilités d'occurrences pour une augmentation d'un millimètre de pluie durant les 30 jours préalables à la journée d'occurrence.

**Tableau 4.15**

Résultats de l'analyse par régression logistique pour la paire de variables ( $R$  et  $A_{30j}$ ) la plus significative dans le déclenchement de glissements de terrain à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis (enregistrements aux 15 minutes)

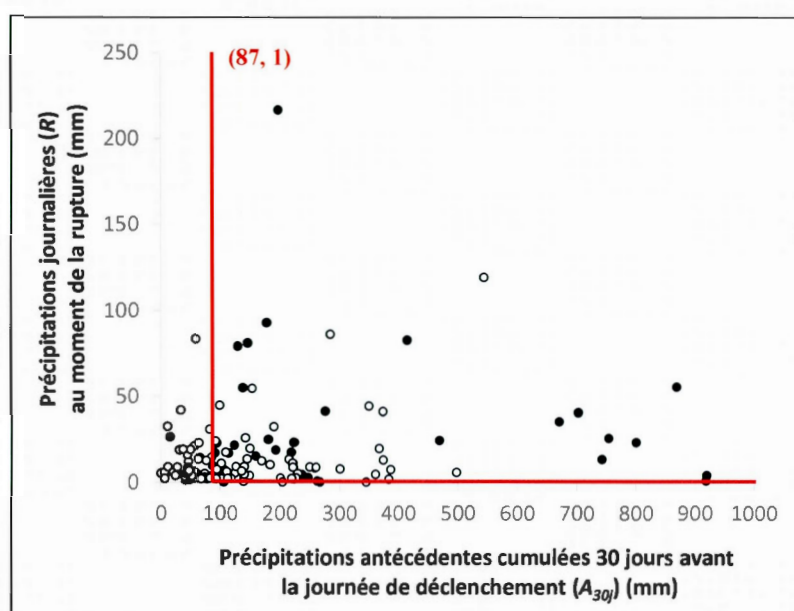
Paramètres ( $X_i$ )	Coefficient ( $\beta$ )	Erreur-type	Signification	Exposant ( $\beta$ )
$R$	0.02503	0.00689	0.00028	1.02535
$A_{30j}$	0.00567	0.00119	$< 0.0001$	1.00569
Constante ( $\alpha$ )	-2.04653	0.61244	0.00083	0.12918

Probabilité initiale de rupture de 0.49

En lien avec la paire de variables identifiée comme la plus influente dans le déclenchement des glissements, un seuil minimum englobant 95 % des données a été établi pour  $R$  et  $A_{(30j)}$



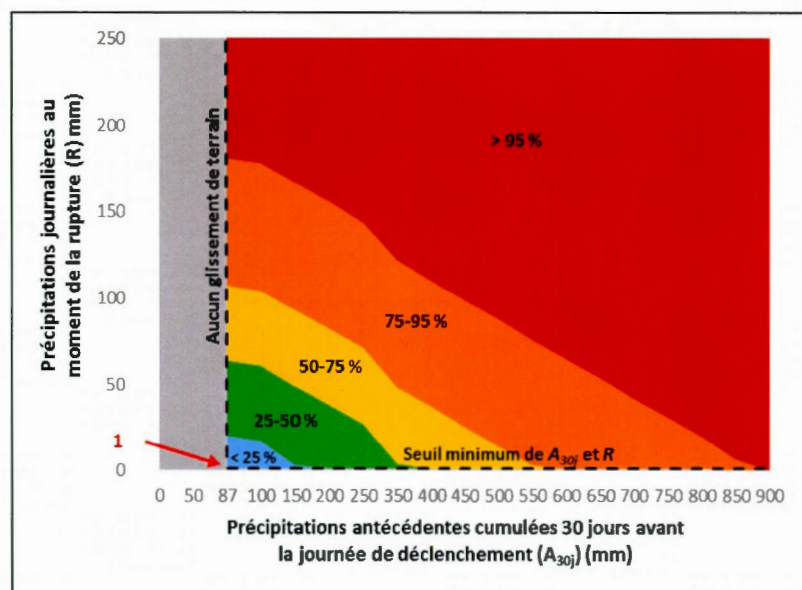
(fig. 4.44). Le seuil pluviométrique associé aux précipitations cumulées 30 jours avant le déclenchement des glissements de terrain équivaut à 87 mm, alors que celui lié aux précipitations journalières au moment de la rupture correspond à un millimètre. Ces seuils représentent les valeurs minimales requises pour initier de glissements de terrain à l'échelle locale. Ainsi, les sols du centre urbain doivent avoir reçu un minimum de 87 mm de précipitations antécédentes sur 30 jours avant la journée d'occurrence et un millimètre de pluie lors de la journée d'occurrence pour que des glissements se produisent.



**Figure 4.44** Seuil minimum (5 %) basé sur les précipitations antécédentes cumulées 30 jours avant la journée de déclenchement et établi pour le centre urbain d'Angra dos Reis à partir de 98 glissements de terrain (cercles noirs) déclenchés lors d'un épisode pluviométrique et 100 événements pluviométriques n'ayant pas déclenchés de glissements de terrain (cercles blancs) entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013.

Conformément au modèle logistique dérivé pour la municipalité d'Angra dos Reis (équation 15), des probabilités d'occurrences ont pu être calculées pour différentes valeurs anticipées de  $R$  et  $A_{(30j)}$  se situant au-dessus des valeurs seuils identifiées. Les valeurs dégagées (fig. 4.45) montrent que des glissements de terrain ont une probabilité d'occurrence minimale de 17,8 % pour des valeurs de  $R$  supérieures à un millimètre et des valeurs de  $A_{(30j)}$  plus élevées que 87 mm. En ce sens, des précipitations journalières de un à 19 mm pour 87 mm de

précipitations antécédentes, de un à 10 mm pour 125 mm de  $A_{(30j)}$  et de un millimètre pour 163 mm de  $A_{(30j)}$  sont requises pour une précision si situant entre 17,8 et 25 %. La capacité prédictive du modèle se situe entre 25 et 50 % pour des mesures de  $R$  entre 19 et 63 mm et une valeur de  $A_{(30j)}$  de 87 mm, entre 10 et 54 mm pour 125 mm de  $A_{(30j)}$ , entre un et 45 mm pour 163 mm antécédents, entre un et 26 mm pour 250 mm de précipitations antécédentes et un millimètre pour 357 mm de  $A_{(30j)}$ . Pour une fiabilité de 50 à 75 %, des précipitations journalières entre 63 et 106 mm pour 87 mm de précipitations antécédentes sur 30 jours, entre 45 et 89 mm pour 163 mm de  $A_{(30j)}$ , entre 26 et 70 mm pour 250 mm antécédents, entre un et 45 mm pour 357 mm de  $A_{(30j)}$ , entre un et 24 mm pour 450 mm antécédents et un millimètre de pluie pour 551 mm de  $A_{(30j)}$  doivent être cumulées. Pour une capacité prédictive de 75 à 95 %, ce sont des précipitations journalières de 106 à 180 mm pour 87 mm de précipitations antécédentes sur 30 jours, de 89 à 166 mm pour 163 mm de  $A_{(30j)}$ , de 70 à 143 mm pour 250 mm antécédents, de 45 à 119 mm pour 357 mm de  $A_{(30j)}$ , de 24 à 98 mm pour 450 mm antécédents, d'un à 75 mm de pluie pour 551 mm de  $A_{(30j)}$  et un millimètre pour 876 mm de précipitations antécédentes qui doivent être cumulées. Enfin, les probabilités d'occurrences sont très élevées (>95 %) si les précipitations journalières dépassent 180 mm pour 87 mm de  $A_{(30j)}$ , 166 mm pour 163 mm antécédents, 143 mm pour 250 mm de précipitations antécédentes, 119 mm pour 357 mm de  $A_{(30j)}$ , 98 mm pour 450 mm de  $A_{(30j)}$ , 75 mm pour 551 mm de  $A_{(30j)}$  et un millimètre pour 876 mm de précipitations antécédentes. Ainsi, un minimum de 267 mm de pluie doit être reçu sur une période de 31 jours (30 jours antécédents + la journée d'occurrence) pour que des glissements de terrain se produisent avec une quasi-certitude (>95 %).



**Figure 4.45** Distribution probabiliste liée à la possible occurrence de glissements de terrain dans le centre urbain d'Angra dos Reis en fonction des variables  $R$  et  $A_{30j}$ . Les probabilités ont été établies à partir de 98 glissements initiés lors d'événements pluviométriques et 100 événements non-déclencheurs répertoriés entre le 19 mai 2011 et le 30 juin 2013. *Rouge* : probabilité d'occurrence  $>95\%$ ; *Orange* : probabilité d'occurrence entre 75 et 95 %; *Jaune* : probabilité d'occurrence entre 50 et 75 %; *Bleu* : probabilité d'occurrence entre 17,8 et 25 %; *Gris* : probabilité d'occurrence  $\approx 0\%$ ; Ligne pointillée : seuil minimum (5 %) associé à  $R$  (1 mm) et à  $A_{30j}$  (87 mm).



## CHAPITRE V

### DISCUSSION

#### 5.1 Dynamique spatio-temporelle des glissements de terrain

Différents mécanismes physiques peuvent être à l'origine du déclenchement des glissements de terrain : les précipitations, la fonte rapide du couvert nival, un changement des niveaux d'eau (marin, riverain, nappe phréatique, etc.), les éruptions volcaniques et les secousses sismiques (Keefer *et al.*, 1987; Wieczorek, 1996; Highland et Bobrowsky, 2008; SafeLand, 2012). Sur le territoire de la municipalité d'Angra dos Reis, le couplage des données pluviométriques avec les glissements de terrain du registre indique que plus de la moitié des ruptures inventoriées sont attribuables aux précipitations. La saturation des pentes par l'eau de pluie représente donc le principal mécanisme de déclenchement des glissements de terrain dans cette partie du Brésil, tel qu'observé par plusieurs auteurs (Guidicini et Iwasa, 1977; Fernandes *et al.*, 2004; Tavares *et al.*, 2004; Soares, 2006; Parrizi *et al.*, 2010; Ribeiro *et al.*, 2013). Par conséquent, le moment d'occurrence et l'emplacement des glissements devraient être fortement liés aux caractéristiques pluviométriques de la région. Toutefois, il est possible que la dynamique spatio-temporelle des glissements dépende aussi d'autres paramètres à nature géologique, géomorphologique et anthropique qui influent sur la stabilité locale des sols.

##### 5.1.1 Dynamique temporelle

Sur le territoire de la municipalité d'Angra dos Reis, la répartition et l'occurrence des glissements de terrain fluctuent dans le temps sur une base inter- et intra-annuelle. Au cours de la période 2008-2013, des glissements sont survenus tous les ans, indépendamment des indices pluviométriques annuels ou du nombre d'évènements déclencheurs. En effet, malgré une pluviosité et un nombre d'épisodes déclencheurs inférieurs à la moyenne en 2012, au moins 158 ruptures, dont 56 à l'échelle locale du centre urbain, ont pu être recensées, démontrant la

haute susceptibilité des sols d'Angra dos Reis à l'occurrence de glissements de terrain. Cette propension aux mouvements gravitaires dans la Serra do Mar a également été observé par Tavares *et al.* (2004) le long du littoral de l'État de São Paulo, adjacent à la municipalité d'Angra dos Reis, lesquels ont recensé un minimum de sept glissements par année entre 1991 et 2000 et ce, malgré des précipitations moindres en 1999. Sur une base intra-annuelle, la tendance observée est similaire alors que des glissements sont susceptibles de se produire tous les mois de l'année en dépit de précipitations et d'évènements déclencheurs moindres à l'hiver (mai à août). Ces données suggèrent qu'une forte proportion des sols de la région et du centre urbain est en état de stabilité précaire, l'occurrence de glissements étant probable même lors d'années et de mois cumulant de faibles précipitations avec peu d'épisodes déclencheurs. Cette prédisposition des sols aux glissements de terrain serait en partie attribuable à l'utilisation désordonnée et incontrôlée du sol, laquelle est effectuée sans planification adéquate et adaptée à l'environnement physique et climatique, ce qui altère les conditions naturelles de stabilité et augmente la fréquence d'occurrence des glissements (Tiranti et Rabuffetti, 2010; CPRM, 2014). À ce sujet, l'imperméabilisation des surfaces liée à l'urbanisation du territoire tend à diminuer l'infiltration et favoriser le ruissellement, ce qui contribue aussi à une augmentation de la fréquence des glissements (Larsen et Torres-Sánchez, 1998). Il est également possible que la forte altération des roches dans la région (Tricart, 1979), liée à un climat tropical humide, favorise le déclenchement de glissements de terrain (Saito *et al.*, 2010).

Même si des glissements de terrain ont été observés chaque année, une proportion plus importante de glissements a eu lieu lors des années 2009, 2010 et 2013 par comparaison aux années 2008, 2011 et 2012 dans le centre urbain et la municipalité d'Angra dos Reis. Ces variations inter-annuelles de l'activité géomorphologique à l'échelle de la municipalité et du centre urbain semblent principalement attribuables à des changements au niveau de la pluviosité annuelle. En effet, les années de forte occurrence concordent avec des moyennes pluviométriques annuelles supérieures à la moyenne, alors que les années caractérisées par une plus faible activité géomorphologique correspondent à des totaux pluviométriques inférieurs à la moyenne. Les ratios d'occurrence sont d'ailleurs très fortement corrélés au pourcentage de pluie délaissée, alors que pour deux fois plus de précipitations enregistrées au cours d'une année donnée, on note généralement deux fois plus de glissements recensés. À cet égard, la forte pluviosité annuelle enregistrée à Angra dos Reis durant les années 2009 et 2010 concorde

avec une phase particulièrement intense du phénomène *El Niño*, caractérisé par un réchauffement anormal des eaux superficielles dans l'océan Pacifique (NOAA, 2014). Cependant, les phases d'*El Niño*, et de *La Niña* par ailleurs, ne seraient pas directement liées aux variations annuelles des précipitations dans la municipalité d'Angra dos Reis (Soares, 2006). *El Niño* aurait vraisemblablement plus d'impacts sur les températures que sur les précipitations dans cette partie du Brésil (Eletronuclear, 2005).

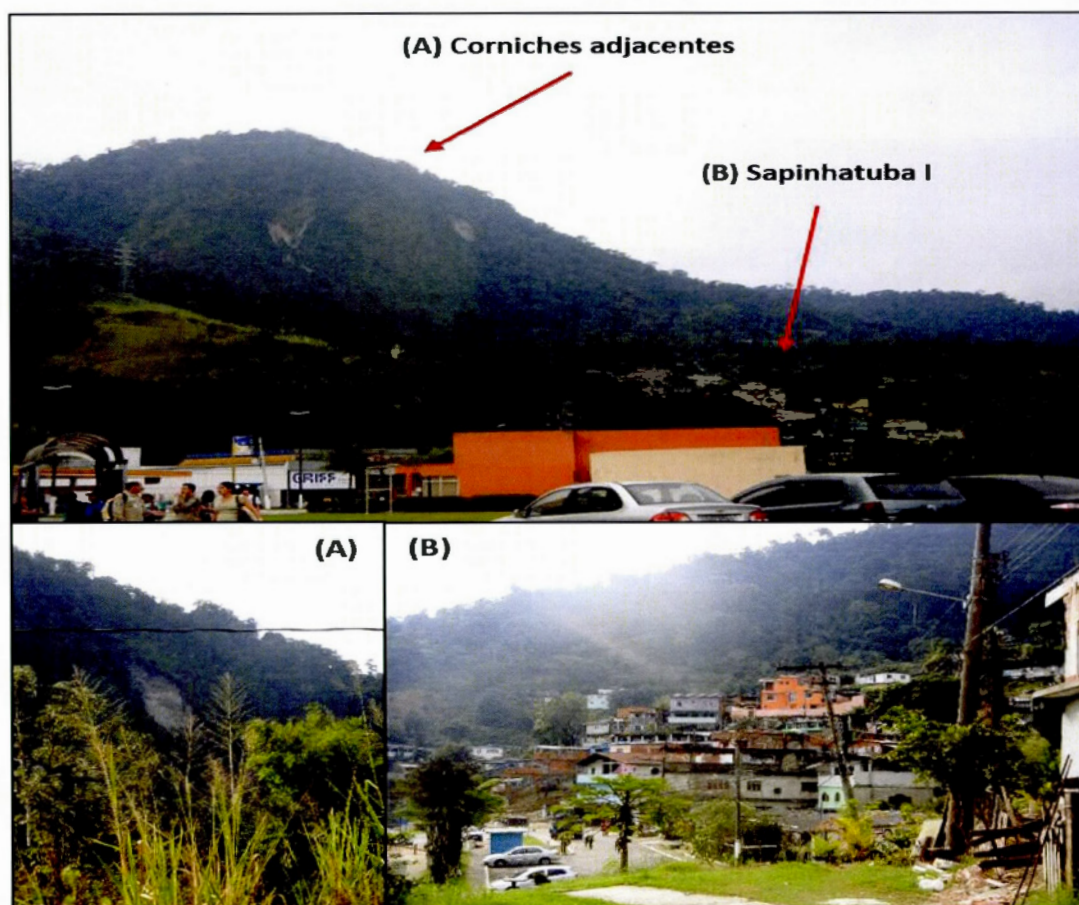
L'étroite corrélation entre la pluviosité et l'intensité de l'activité géomorphologique observée annuellement est également valable sur une base mensuelle et saisonnière. Les observations de Xavier (1996) qui révèlent une fréquence plus élevée des glissements durant les mois à forte pluviosité (octobre à mars) dans la municipalité de Belo Horizonte au Minas Gerais vont dans le même sens. Par ailleurs, la fréquence élevée des cas recensés durant la saison des pluies, et plus particulièrement le mois de janvier, n'est pas étonnante compte tenu des indices pluviométriques mensuels élevés et du fait que des précipitations cumulées entre 200 et 300 mm en seulement une ou deux journées ne sont pas rares (Fernandes *et al.*, 2004). À cet égard, les nombreux glissements recensés au début du mois de janvier 2013 coïncident avec des pluies de plus de 200 mm en 24 heures et 350 mm en 48 heures à certains endroits. Toutefois, la relation entre les ratios d'occurrence et les pourcentages de pluie délaissés apparaît plus évidente sur une base mensuelle que saisonnière. À titre d'exemple, les mois de janvier ont été les plus mouvementés au niveau du nombre de glissements, avec pratiquement le double de la quantité recensée durant les autres mois *humides* (décembre, février, mars et avril) et cinq fois plus qu'au cours des mois plus secs (mai à octobre), ce qui correspond à des ratios similaires en termes de précipitations mensuelles. Sur une base saisonnière, la relation est moins évidente quoique ce sont 66 % des glissements qui ont été déclenchés à l'échelle locale et 69 % à l'échelle régionale. Il en va de même pour les saisons *sèches* et de transition qui ont respectivement recensé 12 à 14 % et 14 à 22 % des glissements pour 17 et 29 % du total pluviométrique. Ces ratios saisonniers laissent présager une dynamique temporelle légèrement différente à l'échelle locale durant les mois de transition, alors que davantage de glissements ont été initiés dans le centre urbain proportionnellement à la municipalité. Une explication possible est que les sols de la municipalité requièrent plus de précipitations pour déclencher des glissements, faisant en sorte que le seuil pluviométrique de déclenchement n'est habituellement franchi que lors de précipitations abondantes qui surviennent généralement



durant la saison *humide*. En contrepartie, les ratios de déclenchement plus élevés dans le centre urbain durant la saison de transition suggèrent que le dépassement du seuil est plus fréquent qu'à l'échelle régionale durant cette période. De plus, la durée requise pour que des événements pluviométriques déclenchent des glissements de terrain dans le centre urbain est de 5 à 22 heures plus courte par comparaison à l'ensemble de la municipalité. Ceci consolide l'idée d'un centre urbain plus propice à l'occurrence de glissements. Le fort taux d'urbanisation dans le centre urbain par comparaison à l'ensemble de la municipalité, qui a inévitablement modifié les conditions naturelles de stabilité, pourrait être à l'origine de cette tendance (De Carvalho *et al.*, 2012). Néanmoins, il est aussi possible que cette réduction de la durée soit liée à des précipitations plus intenses dans cette partie de la municipalité ce qui aurait pour effet de déclencher des glissements de terrain plus rapidement pour des totaux pluviométriques similaires. Compte tenu de ce qui précède, la quantité de pluie délaissée inter- ou intra-annuellement semble un bon indicateur de l'ampleur de l'activité géomorphologique attendue à l'échelle du centre urbain et de la municipalité d'Angra dos Reis. Cependant, la dynamique géomorphologique distincte aux deux échelles d'études durant les mois de septembre, octobre et novembre est annonciatrice de seuils de déclenchement légèrement différents, possiblement en raison de propriétés géologiques, géomorphologiques et anthropiques contrastantes.

En ce qui concerne la distribution chronologique des glissements de terrain à l'échelle régionale, ce sont les régions pluviométriques situées au sud de la municipalité (Japuiba, Angra dos Reis et Jacuecanga) qui sont systématiquement affectées par un plus grand nombre de glissements, soit un peu plus du trois quarts de tous les glissements recensés entre 2008 et 2013. Très peu de glissements ont été répertoriés dans la région pluviométrique *Serra D'água* et dans les zones végétalisées du Plateau Bocaína, possiblement lié à la faible population dans cette partie montagneuse de la municipalité, laquelle limite la transmission d'informations aux autorités compétentes; sachant que les glissements n'affectant pas la population ne sont généralement pas notifiés ni répertoriés (Tiranti et Rabuffetti, 2010). À l'échelle locale du centre urbain, la distribution des glissements de terrain est plus hétérogène en raison d'une aire limitée qui restreint les variations spatiales au niveau des conditions pluviométriques de déclenchement et des paramètres géologiques, géomorphologiques et anthropiques. Néanmoins, davantage de glissements ont été répertoriés dans les quartiers *Sapinhatura I* et *Monte Castelo*. Ce léger regroupement des glissements dans ces quartiers du centre urbain n'est

pas surprenant compte tenu de la présence de colluvions épaisses (10 à 20 m) sujettes à des réactivations fréquentes (de Castro, 2012). Ces dépôts, constitués de matériel hétérogène issu de mouvements gravitaires récurrents dans les falaises adjacentes (fig. 5.1), sont localisés dans la partie concave au pied des versants et sont par conséquent fortement altérés avec plus de 40 % d'argile (Jones, 1973; Wolle et Hachich, 1989; Fernandes *et al.*, 2004). Ainsi, il n'est pas inhabituel que ces masses colluviales expérimentent des épisodes saisonniers de mouvements accélérés sous forme de reptation (fig. 5.2) liées à des périodes pluvieuses (de Castro, 2012; Safeland, 2012). À cet égard, les travaux de Corominas et Moya (1999) en Espagne et de Floris *et al.* (2004) dans la région des Marches en Italie stipulent que les sols mal drainés (faible perméabilité) sont davantage sujets à la réactivation de glissements de terrain et dépendent fortement des conditions pluviométriques antécédentes.



**Figure 5.1** Exemples de mouvements gravitaires dans les falaises adjacentes au quartier Sapinhatura I (Photos : juin 2013).





**Figure 5.2** Répercussions visibles des mouvements de reptation dans le secteur Sapinhatuba I (Photos : juin 2013).



Sur une base saisonnière, un bilan équivalent peut être dressé alors que les zones méridionales ont été constamment plus touchées par les glissements que les zones situées au nord et ce, tant lors de la saison humide que lors de la saison sèche ou de transition. Ces tendances inter- et intra-annuelles s'opposent aux valeurs enregistrées par les six régions pluviométriques qui ont été continuellement plus élevées dans la partie septentrionale (Mambucaba, Bracuí et Serra D'água) par comparaison à la partie méridionale. Cette fréquence accrue au sud, malgré des précipitations moins importantes, laisse présager des conditions géologiques, géomorphologiques et d'occupation du sol plus favorables à l'occurrence de glissements de terrain dans cette partie de la municipalité. Ce constat semble d'ailleurs renforcé par l'analyse de l'année 2011 durant laquelle une distribution plus uniforme des glissements à l'échelle de la région a été observée malgré une disparité nord-sud plus marquée en termes de pluviosité, avec un écart moyen de 1167 mm entre les pluviomètres. À cet égard, la région pluviométrique *Angra dos Reis*, où environ 38 % de tous les glissements ont été déclenchés, semble particulièrement prédisposée aux glissements. En effet, le nombre de glissements déclenchés par événement pluviométrique déclencheur est plus élevé dans la région *Angra dos Reis* (4,4 / épisode) et le centre urbain (4,1 / épisode), par comparaison au reste de la municipalité (3,3 / épisode), ce qui sous-entend un risque accru pour la population et les infrastructures dans cette partie de la municipalité. De plus, l'analyse des événements pluviométriques ayant déclenché des glissements de terrain dans le centre urbain et l'ensemble de la municipalité renforce cette idée, avec un épisode sur deux ayant mené à des glissements à l'échelle locale par comparaison à une fois sur trois à l'échelle régionale. Cette récurrence accrue des événements déclencheurs à l'échelle locale par rapport à l'ensemble de la municipalité semble liée à la forte urbanisation du territoire et aux activités anthropiques associées qui tendent à réduire la quantité de pluie requise au déclenchement de glissements de terrain (Chowdhury and Flentje, 2002; Van Westen, 2003; Zêzere *et al.*, 2005; Ribeiro *et al.*, 2013). Cette interprétation est sujette à caution compte tenu qu'avec les données pluviométriques aux 15 minutes, le ratio d'épisode déclencheur est plus faible à l'échelle locale (1 sur 5) que régionale, ce qui laisse présager une influence significative de la résolution des enregistrements pluviométriques sur le nombre d'événements déclencheurs identifiés.

Somme toute, l'analyse de l'occurrence des glissements de terrain répertoriés sur une base inter- et intra-annuelle montre que des glissements sont susceptibles de se produire tous les

mois et tous les ans, indépendamment des caractéristiques pluviométriques et de l'échelle d'étude. L'ampleur de l'activité géomorphologique varie quant à elle assez étroitement en fonction de la pluviosité mensuelle, saisonnière et annuelle et ce, aux deux échelles d'étude. L'occurrence de glissements est ainsi influencée par les caractéristiques climatiques à l'échelle de la municipalité. Néanmoins, une dynamique légèrement différente entre le centre urbain et la municipalité durant la saison de transition laisse entrevoir des conditions de déclenchement contrastantes à l'échelle du territoire. De plus, le fait que davantage de glissements aient été déclenchés au sud de la municipalité, où des précipitations moins abondantes sont survenues, consolide l'idée que des conditions géologiques, géomorphologiques et d'occupation du sol plus favorables à l'occurrence de glissements de terrain existent dans certaines parties de la municipalité, particulièrement dans les zones fortement urbanisées et densément peuplées où les activités anthropiques altèrent les conditions naturelles de stabilité.

#### 5.1.2 Dynamique spatiale

L'endroit précis où est déclenché un glissement de terrain lors de précipitations varie généralement en fonction des facteurs climatiques, essentiellement la pluviosité, et des caractéristiques géologiques, géomorphologiques et anthropiques qui influencent la capacité d'infiltration des sols et leur saturation subséquente (Kim *et al.*, 1991; Wiczorek, 1996; Highland et Bobrowsky, 2008). Dans la municipalité d'Angra dos Reis, il a été observé que la distribution des glissements n'est pas fortement corrélée à la quantité de pluie enregistrée localement; davantage de ruptures s'étant produites au sud malgré des précipitations moindres. De la sorte, il est fort probable que des paramètres statiques et inhérents tels que la lithologie, l'occupation du sol, l'angle des pentes et leur orientation aient une plus grande influence sur la répartition des glissements en prédisposant certains sols plus que d'autres à des ruptures et en agissant comme catalyseurs afin de permettre à des facteurs dynamiques de déstabilisation comme les précipitations d'opérer plus efficacement (Glade et Crozier, 2005).

À propos de la lithologie comme facteur prédisposant, il semble que les orthogneiss constituent la classe de roche la plus susceptible aux mouvements de masse suivis des dépôts alluviaux et fluvio-marins (DAFM), des granites puis des paragneiss. À l'échelle régionale, les orthogneiss et les DAFM sont particulièrement enclins à l'occurrence de glissements de terrain lors

d'épisodes pluviométriques, accaparant 42 et 32 % des cas entre 2008 et 2013 pour des superficies respectives de seulement 26 et 10 %. Une explication plausible pour cette situation réside dans la localisation de ces classes. En effet, les orthogneiss et les DAFM englobent la majeure partie des zones urbaines présentes dans la municipalité, lesquelles sont en général plus susceptibles aux mouvements de sol (Chowdhury and Flentje, 2002; Van Westen, 2003; Ribeiro *et al.*, 2013) et davantage peuplées, ce qui facilite la transmission d'informations aux autorités compétentes; sachant que les glissements n'affectant pas la population ne sont généralement pas notifiés ni répertoriés (Tiranti et Rabuffetti, 2010). Aussi, la présence d'orthogneiss et de DAFM est principalement associée aux zones de vallées ( $\leq 400$  m), où 99,9 % (1637 sur 1640) des glissements ont été répertoriés, par comparaison aux zones montagneuses, où seulement trois cas ont été recensés. Selon des études réalisées par Tiranti et Rabuffetti (2010) en Italie et Pereira et Zêzere (2012) au Portugal, les vallées (et inévitablement les orthogneiss et DAFM) nécessitent davantage de précipitations pour déclencher des glissements de terrain par comparaison aux zones montagneuses, et sont par conséquent plus prédisposées aux glissements. Par ailleurs, la forte proportion de cas ayant été recensés en zones de vallées compte probablement pour beaucoup dans les ratios d'occurrence associés aux divers domaines lithologiques. Cette tendance n'est cependant pas surprenante étant donné que les processus de versants dans la Serra do Mar surviennent majoritairement sur la marge Atlantique, dans le tiers inférieur des pentes (Furian *et al.*, 1999). Concernant la vaste proportion de glissements initiés uniquement dans les DAFM, il est probable que la nature détritique et non-consolidée du matériel favorise davantage la mobilisation des sédiments sous forme de coulée de débris lors de précipitations suffisantes pour générer du ruissellement (Kanji *et al.*, 2003). Quant à la fréquence généralement élevée des glissements dans les différentes classes lithologiques de la municipalité d'Angra dos Reis, le minimum étant de 110 glissements pour les paragneiss, elle est possiblement liée aux propriétés minéralogiques et structurales des roches. D'une part, la structure minéralogique des roches est dominée par la biotite, qui est considérée par Tricart (1979) comme une source de faiblesse pour les roches. Ce constat est soutenu par l'étude de Mazza (2007) dans la municipalité d'Angra dos Reis, lequel a dénombré 77 ruptures par photo-interprétation (51,6 %) dans les gneiss à biotite sur 149 glissements recensés en juin 2005. D'autre part, les fractures tectoniques associées aux différentes roches pourraient jouer un rôle crucial dans le déclenchement des glissements de



terrain. En effet, il a été observé que les fractures tectoniques dans les socles précambriens (granites, othogneiss et paragneiss) de la ville de Rio de Janeiro, également issue de l'orogénèse Ribeira, jouaient un rôle clé dans le déclenchement de glissements de terrain en contrôlant l'infiltration de l'eau et les processus d'altération (Jones, 1973; Fernandes *et al.*, 2004). En somme, la lithologie semble être une composante qui permet d'expliquer, en partie du moins, la répartition spatiale des glissements de terrain à Angra dos Reis.

La constatation que les pentes dont l'inclinaison varie entre 10 et 35° sont plus propices à l'occurrence de glissements, avec 66 % des tous les cas recensés tant à l'échelle du centre urbain qu'à l'échelle de la municipalité, est soutenue par les travaux de Mazza (2007) qui a obtenu une valeur de 64 % dans la municipalité d'Angra dos Reis et par ceux de Junior (2007) dont 53 % des glissements recensés le long de la *Costa Verde* dans l'État de Rio de Janeiro ont été déclenchés sur des pentes entre 10 et 30° (24 % entre 30 et 40°). En ce qui a trait à la forte variation des ratios de glissements déclenchés sur des pentes inférieures à 10° et supérieures à 35° entre la zone locale, où davantage de glissements ont été initiés sur des pentes fortes (>35°), et la zone régionale, où plus de ruptures ont été associées à des pentes faibles (<10°), ceci est possiblement lié à la délimitation de la zone d'étude locale qui exclue la portion très proximale à la côte (<10 m d'altitude). En ce sens, ce sont presque exclusivement des zones de versants, dont les angles sont supérieurs à 10°, qui composent le centre urbain, ce qui limite la probabilité qu'un glissement soit déclenché sur une pente plus douce. De plus, la résolution plus fine du modèle digital d'élévation (MDE) employé à l'échelle locale est possiblement à l'origine d'une identification plus précise des valeurs d'inclinaison, laquelle accroît le nombre de cas répertorié sur des pentes abruptes. Dans tous les cas, ceci était attendu étant donné que les pentes douces ont généralement une fréquence de glissements de terrain plus faible en raison de contraintes de cisaillement moins élevées (Larsen et Torres-Sánchez, 1998). De plus, Cruz (1974) estime qu'une inclinaison supérieure à 22° dans les montagnes de la Serra do Mar favorise l'occurrence de glissements de terrain, indépendamment de la couverture végétale et de l'occupation humaine. À cet égard, il est probable que la forte urbanisation dans le centre urbain et la municipalité d'Angra dos Reis depuis les années 1970 (dos Santos, 2007; IBGE, 2014), ayant causé la déforestation des versants, soit à l'origine d'un abaissement du seuil topographique. Ceci expliquerait, du moins en partie, la forte proportion de cas répertoriés sur des pentes inférieures à 20°. Bref, même si l'inclinaison des pentes est un attribut

topographique majeur, affectant à la fois les conditions hydrologiques et la stabilité des sols, le fait que plusieurs glissements aient été initiés sur des pentes douces ( $<20^\circ$ ) suggère une surestimation de son importance et atteste que d'autres paramètres topographiques, comme le profil des versants (concave, convexe, linéaire) et les zones de convergence topographique affectant la concentration des eaux de surface et souterraines, ont possiblement une influence dans la déstabilisation des sols (Fernandes *et al.*, 2004).

En ce qui a trait à l'orientation des versants, la distribution des glissements à l'échelle locale et régionale dénote une susceptibilité plus élevée à l'occurrence de glissements pour les versants orientés au sud qui s'explique vraisemblablement par la direction des vents dominants soufflant essentiellement vers le nord et à la présence de la Serra do Mar, dont l'élévation et l'alignement est-ouest favorisent le soulèvement orographique des masses d'air, augmente l'humidité des sols et facilite le ruissellement de l'eau de pluie pouvant générer des écoulements (Nunes et Modesto, 1992; Nadim *et al.*, 2009; Vieira *et al.*, 2010). Selon les travaux de Larsen et Torres-Sánchez (1998) sur l'île tropicale de Puerto Rico, l'humidité dérivée des vents dominants fournit une explication plausible dans la distribution des glissements de terrain à l'échelle locale et régionale. De plus, les résultats obtenus dans cette étude semblent concluants dans la mesure où ils concordent avec ceux de Junior (2007), indiquant que trois glissements sur quatre sont déclenchés sur les versants sud, un sur cinq sur les versants nord et la balance sur les versants est et ouest. Néanmoins, les ratios obtenus sont sujets à caution compte tenu d'une couverture territoriale beaucoup plus importante associée aux versants nord et sud.

Enfin, il semble évident en fonction de la quantité de glissements recensés dans chaque catégorie d'occupation du sol que les zones urbaines sont les plus prédisposées à l'occurrence de glissements de terrain, spécialement dans le centre urbain. Ceci n'a rien de surprenant étant donné que l'occupation du sol et l'utilisation qui en est faite représentent un des plus importants paramètres influant sur la fréquence des glissements de terrain (Guerra et Mendonça, 2004; Larsen et Torres-Sánchez, 2008). À Angra dos Reis, la topographie accidentée, qui limite la superficie de terres disponibles et convenables à l'implantation humaine, et l'absence d'une réglementation relative à l'aménagement du territoire ont occasionné un développement chaotique du territoire depuis 1970. Ce développement chaotique a mené à la déforestation des versants, à l'imperméabilisation des surfaces, à la transformation de plateaux en pâturages et

au développement résidentiel sur des versants raides (surtout des favelas), générant de surcroît une accumulation de déchets sur les versants, un changement dans les conditions naturelles de drainage, ainsi que des activités anthropiques de remblaiement et d'excavation qui ont affecté la stabilité des pentes et augmenté la probabilité d'occurrence des glissements de terrain (Chowdhury and Flentje, 2002; Fernandes *et al.*, 2004; Ribeiro *et al.*, 2013). Tel que mentionné par le Ministère des Villes (MIC, 2006), ces transformations des conditions naturelles ont réduit la quantité de pluie nécessaire au déclenchement de glissements de terrain, et sont par conséquent en partie responsables de l'accélération de l'activité géomorphologique naturelle. Si des ruptures surviennent en majeure partie dans les zones urbaines dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis, il demeure que des ruptures peuvent se produire sur tous les autres types de surfaces considérées. Ceci est particulièrement le cas des espaces recouverts de forêt où 18 à 27 % des glissements ont été recensé et ce, malgré des propriétés intrinsèques (accroissement de la charge normale, augmentation de la cohésion apparente générée par le système racinaire, abaissement de la nappe phréatique et diminution de la fissuration du sol) qui tendent à augmenter la résistance au cisaillement des sols (Selby, 1993). Cette fréquence accrue des glissements de terrain en zone de forêt par comparaison aux pâturages et aux dunes de sable, malgré des conditions plus favorables dans ces dernières, s'explique essentiellement par l'aire de couverture associée aux trois catégories qui est significativement plus élevée pour les zones végétalisées. Néanmoins, la fréquence observée dans les zones urbaines est 2,1 à 4,2 fois plus importante que dans les zones végétalisées telle qu'observée par Larsen et Torres-Sánchez (1998) à Puerto Rico (e.g. une fréquence de 2,3 à 8,4 fois plus importante sur les versants modifiés par l'être humain). Enfin, il est à noter que les zones de pâturages sont également des endroits propices à l'occurrence de glissements de terrain du fait qu'ils se situent essentiellement dans les hauts versants et sur les plateaux de la municipalité d'Angra dos Reis, des zones où le remodelage et la compaction du sol par le piétinement bovin tend à augmenter le ruissellement le long de ces terrassettes, à favoriser le développement de ravines et conséquemment, à réduire la stabilité des pentes (da Silva et Filho, 2009; Teixeira et Guimarães, 2012).

En somme, les paramètres biophysiques (lithologie, inclinaison, orientation des pentes, occupation du sol) qui caractérisent la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis semblent bel et bien affecter la dynamique spatiale des glissements de terrain. À cet égard,



seule l'inclinaison des pentes ne donne pas des résultats significatifs considérant que des glissements peuvent survenir à part égale dans toutes les classes considérées. Néanmoins, l'occurrence de glissements de terrain apparaît être particulièrement propice dans les zones urbaines, les pentes orientées vers le sud et dans les secteurs constitués d'orthogneiss et de dépôts alluviaux et fluvio-marins. N'en demeure pas moins qu'aucun attribut spécifique ne permet d'expliquer à lui seul la fréquence et la distribution des glissements de terrain à l'échelle locale et régionale.

## 5.2 Conditions pluviométriques pour l'occurrence de glissements de terrain

### 5.2.1 Conditions basées sur la durée des événements pluviométriques (*ED*)

Les seuils basés sur la durée des événements pluviométriques (*ED*) pour les différentes régions pluviométriques, le centre urbain et la municipalité d'Angra dos Reis ont d'abord été comparés pour voir si les conditions pluviométriques de déclenchement des glissements de terrain varient de manière significative à l'échelle du territoire. Le seuil *ED* établi à l'échelle locale à partir des enregistrements journaliers a également été comparé à celui élaboré à la même échelle, mais à partir des enregistrements aux 15 minutes, afin d'évaluer l'effet de la fréquence des enregistrements sur les valeurs pluviométriques minimales requises pour initier des glissements dans le centre urbain. Enfin, les seuils *ED* élaborés ont ensuite été comparés à d'autres seuils établis dans la littérature pour le Brésil, les régions tropicales et à travers le monde.

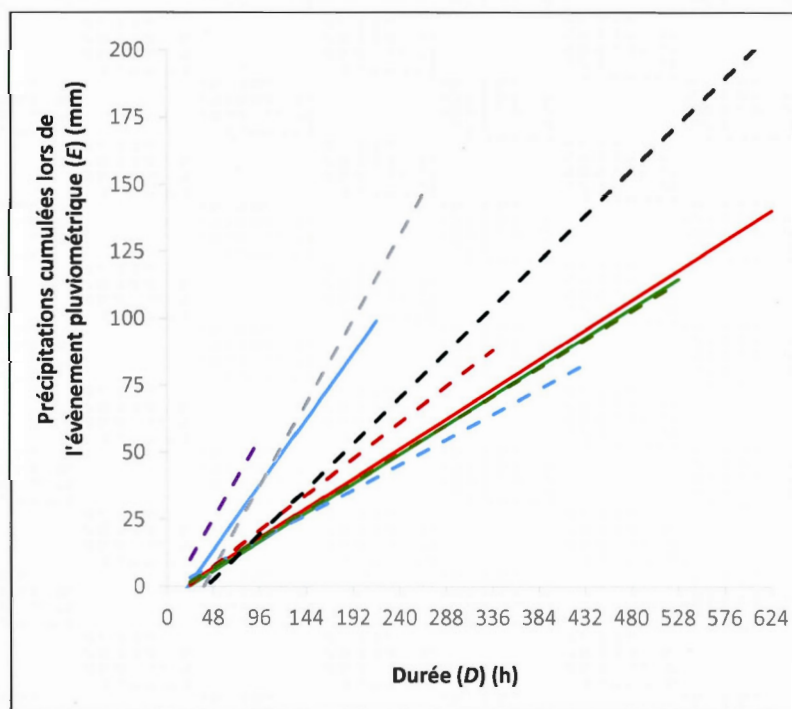
#### 5.2.1.1 Comparaison des seuils établis dans cette étude

Les seuils établis à l'échelle du centre urbain et de la municipalité d'Angra dos Reis montrent que la majorité des glissements de terrain sont associés à des événements pluviométriques ayant cumulé moins de 216 mm entre 24 et 216 heures. Plusieurs glissements ont néanmoins été déclenchés par des précipitations plus importantes pouvant atteindre 540 mm sur 26 jours. Cette forte dispersion des données est en partie attribuable aux précipitations faibles et continues sur plusieurs jours, intercalées de précipitations plus intenses, qui ne sont pas inhabituelles dans une région tropicale comme Angra dos Reis et qui inévitablement

accroissent la durée et les valeurs cumulées des événements (Ribeiro *et al.*, 2013). Toutefois, elle est surtout attribuable à la définition employée d'un événement pluviométrique et à l'utilisation de données journalières qui limitent l'identification de la fin d'un événement à une période de 24 heures sans précipitations (Saito *et al.*, 2010). Cette résolution journalière tend à allonger la durée des épisodes identifiés et les valeurs cumulées associées, ce qui favorise une plus large dispersion des données et réduit la fiabilité des seuils établis (Brunetti *et al.*, 2010; Peruccacci *et al.*, 2012; Vennari *et al.*, 2014). De plus, les données journalières ne permettent pas de cerner le pic d'intensité pluviométrique, une mesure fondamentale dans une région comme Angra dos Reis où les précipitations convectives de courtes durées et de fortes intensités déclenchent régulièrement des glissements de terrain (Reichenbach *et al.*, 1998).

En ce qui a trait aux valeurs seuils dégagées (fig. 5.3), elles sont d'abord très semblables à l'échelle du centre urbain et de la municipalité pour toutes les durées considérées, quoique légèrement inférieures à l'échelle locale. Par conséquent, les valeurs des paramètres empiriques dérivés à l'échelle locale ( $\alpha = -5,19$ ;  $\beta = 0,2269$ ) sont pratiquement identiques à celles obtenues à l'échelle régionale ( $\alpha = -4,2$ ;  $\beta = 0,2312$ ). L'écart en termes de quantité de pluie requise pour initier des glissements s'accroît que très légèrement en fonction d'un accroissement de la durée des épisodes pluviométriques, le centre urbain nécessitant environ un millimètre de moins que la municipalité pour des précipitations d'une durée inférieure à 4-5 jours et trois millimètres de moins pour des épisodes durant plus de 15 jours. À cet égard, les deux limites établies indiquent que des glissements peuvent être déclenchés avec à peine 22-24 mm en 120 heures et 60-62 mm en 288 heures. La durée moyenne des événements déclencheurs est également similaire aux deux échelles, soit environ 101-108 heures. Au premier regard, il semble donc que les conditions de déclenchement des glissements de terrain soient uniformes sur l'ensemble du territoire couvert par la municipalité d'Angra dos Reis et ce, malgré un régime pluviométrique variable (particulièrement nord-sud) et une répartition hétérogène de la lithologie, l'orientation des versants, l'inclinaison des pentes et de l'occupation du sol. Ceci apparaît surprenant étant donné que les seuils locaux se positionnent généralement dans la partie supérieure des graphiques par comparaison aux seuils régionaux (Guzzetti *et al.*, 2007). De plus, la forte urbanisation du centre urbain par comparaison à l'ensemble de la municipalité laissait présager des valeurs pluviométriques plus faibles à l'échelle locale, l'anthropisation des milieux ayant tendance à réduire la quantité de pluie requise pour déclencher des glissements

de terrain, particulièrement dans les villes brésiliennes (MIC, 2006; Ribeiro *et al.*, 2013). Néanmoins, ce constat est à interpréter avec prudence compte tenu de la forte influence exercée par la région pluviométrique *Angra dos Reis* dans l'élaboration du seuil régional (38,9 % des glissements), dont la zone de couverture s'apparente à celle du centre urbain (échelle locale).



**Figure 5.3** Comparaison des seuils *ED* minimum (5 %) établis pour la municipalité d'Angra dos Reis, le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes) et les six régions pluviométriques (Mambucaba, Bracuí, Serra D'água, Japuiba, Angra dos Reis et Jacuecanga). Rouge : municipalité d'Angra dos Reis; Vert : centre urbain (données journalières); Bleu : centre urbain (données aux 15 minutes); Gris (tirets) : région Mambucaba; Bleu (tirets) : région Bracuí; Mauve (tirets) : région Serra D'água; Rouge (tirets) : région Japuiba; Vert (tirets) : région Angra dos Reis; Noir (tirets) : zone Jacuecanga.

Il semble donc pertinent d'approfondir les analyses en comparant les seuils proposés à l'échelle locale et régionale aux seuils établis pour chaque région pluviométrique. Au premier regard, la forte variation des seuils établis pour les différentes régions pluviométriques semble affaiblir l'hypothèse de conditions de déclenchement uniformes à l'échelle de la municipalité. En effet, les régions *Serra D'água*, *Mambucaba*, *Jacuecanga* et *Japuiba* ont des valeurs seuils 1,2



(*Japuiba*) à 3 fois (*Serra D'água*) plus élevées que ceux établis pour le centre urbain et la municipalité d'Angra dos Reis, ce qui laisse entrevoir une susceptibilité réduite à l'occurrence de glissements de terrain par comparaison à *Bracuí* et *Angra dos Reis*. Toutefois, le seuil établi pour la région *Serra D'água* n'a pas une base de données suffisante pour permettre l'établissement de seuils fiables et représentatifs des conditions pluviométriques de déclenchement (Peruccacci *et al.*, 2012), et par la confirmation ou l'infirmer de cette tendance. Néanmoins, il est évident que les seuils de *Mambucaba*, *Jacuecanga* et *Japuiba* biaisent la limite régionale en la déplaçant vers le haut et ce, fort probablement en raison de propriétés géologiques, géomorphologiques et d'occupation du sol différentes et défavorables à l'occurrence de glissements dans ces secteurs. Une couverture végétale plus dense pourrait expliquer le rehaussement des valeurs seuils. En effet, il est reconnu que la végétation tend à améliorer la stabilité des sols en augmentant la résistance au cisaillement, ce qui inévitablement augmente la quantité de pluie requise pour initier des glissements par comparaison à des milieux anthropisés (Selby, 1993; Montgomery *et al.*, 2000). Le fait que le seuil *Angra dos Reis* soit pratiquement identique au seuil local et régional semble valider la forte influence exercée par les données provenant de ce secteur dans l'élaboration de seuils régionaux et locaux (centre urbain) et suggère des conditions de déclenchement similaires à l'échelle de la région pluviométrique *Angra dos Reis* et le centre urbain et ce, même si cette dernière est plus densément urbanisée et couvre un territoire plus restreint. En ce qui a trait au seuil de *Bracuí*, son positionnement dans le bas du graphique, tel que représenté par la faible inclinaison de la droite ( $\beta = 0,195$ ), semble liée à la nature géologique (paragneiss) puisque tous les glissements déclenchés dans les paragneiss proviennent de ce secteur. La comparaison des seuils établis en fonction des divers domaines lithologiques (section 5.2.4.1) permettra toutefois de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

De manière générale, les valeurs pluviométriques de déclenchement obtenues à l'échelle locale et régionale à partir des enregistrements pluviométriques journaliers semblent relativement faibles, particulièrement pour des événements dont la durée est inférieure à 216 heures. D'une part, ces résultats supposent une forte influence des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain qui aurait pour effet de réduire considérablement les valeurs de déclenchement (Campbell, 1975, Cannon et Ellen, 1985; Aleotti, 2004; Nadim *et al.*, 2009). Cette hypothèse est renforcée par l'obtention de faibles coefficients de

détermination ( $R^2$ ) associés aux droites de régression qui indiquent que d'autres variables pluviométriques, non prises en compte dans le modèle, influencent aussi le déclenchement des glissements dans la municipalité. D'autre part, il est possible que la présence de sols fortement altérés pouvant facilement atteindre plus de 10 mètres d'épaisseur dans la région (Tricart, 1979; de Castro, 2012) ainsi que les conditions géologiques, géomorphologiques et d'occupation du sol propre à la région prédisposent les versants à l'occurrence de glissements de terrain en abaissant les valeurs seuils.

La comparaison du seuil établi dans le centre urbain à partir des enregistrements journaliers et celui élaboré à la même échelle, mais à partir des enregistrements aux 15 minutes, remet en perspective les résultats obtenus précédemment et donne un aperçu de l'influence exercée par la résolution des enregistrements pluviométriques sur les valeurs seuils. L'utilisation des données pluviométriques mesurées aux 15 minutes semble altérer significativement la limite dégagée à partir des données journalières, la droite étant plus inclinée et beaucoup plus courte. Ceci signifie que des événements plus courts et cumulant davantage de pluie sont nécessaires pour déclencher des glissements de terrain dans le centre urbain par rapport à ce qui avait précédemment été envisagé. En effet, l'utilisation de données plus fréquentes réduit la durée des événements pluviométriques identifiés, la majorité durant moins de 83 heures (maximum de 216 heures) par comparaison à 115 heures lorsque les données journalières sont utilisées (maximum de 528 heures). L'année 2012 est probante quant au fait que l'emploi de mesures pluviométriques plus fréquentes mène à davantage d'épisodes détectés, à moins de glissements de terrain associés à des événements pluviométriques et à moins d'événements déclencheurs identifiés. Les mesures pluviométriques plus fréquentes permettent une identification plus précise du début et de la fin d'un événement pluviométrique (Fratini *et al.*, 2009; Brunetti *et al.*, 2010). L'identification d'événements plus courts a également permis de réduire la dispersion des données en diminuant les totaux pluviométriques associés à chaque glissement, ce qui augmente la fiabilité du seuil établi (Brunetti *et al.*, 2010; Peruccacci *et al.*, 2012; Vennari *et al.*, 2014). À cet égard, une définition réduisant à 6 heures la durée requise pour mettre fin à un épisode pluviométrique aurait entraîné un abaissement des valeurs cumulées liées aux glissements, diminuant de surcroît la dispersion des données et améliorant la fiabilité du seuil (Tiranti et Rabuffetti, 2010). Ceci montre à quel point la définition d'un événement pluviométrique influence fortement les valeurs seuils dégagées et les interprétations qui en

découlent (Berti *et al.*, 2012). Sur une base méthodologique, l'emploi de données pluviométriques aux 15 minutes permet d'éliminer le regroupement des points à des durées spécifiques, soit à toutes les 24 heures, ce qui augmente aussi la précision du seuil (Guzzetti *et al.*, 2007). Enfin, le seuil dégagé à partir des enregistrements aux 15 minutes diffère largement des autres seuils fiables proposés, contredit l'idée que des conditions de déclenchement similaires existent à l'échelle de la région pluviométrique *Angra dos Reis* et du centre urbain. De plus, le positionnement du seuil suggère une propension plus faible aux glissements dans le centre urbain, ce qui remet en question le rôle de l'urbanisation dans l'abaissement des limites pluviométriques. Toutefois, il est fort probable que le rehaussement du seuil soit davantage lié à des aspects méthodologiques plutôt qu'à des paramètres comme l'occupation du sol. Néanmoins, si l'on considère ce seuil comme plus représentatif et fiable que celui établi à partir des données journalières, ceci voudrait dire que l'urbanisation du territoire dans la municipalité d'*Angra dos Reis*, plus particulièrement dans le centre urbain, a pour effet de rehausser les valeurs pluviométriques seuils, ce qui est contraire à la logique (Chowdhury and Flentje, 2002; Fernandes *et al.*, 2004; Ribeiro *et al.*, 2013). Toutefois, cela signifie peut être aussi que les seuils établis à l'échelle régionale à partir des données journalières n'illustrent pas adéquatement les conditions réelles de déclenchement et que l'emploi de données pluviométriques plus précises engendrerait un rehaussement des valeurs régionales et par conséquent, une réinterprétation de l'influence exercée par les différents paramètres. Somme toute, le seuil employant les mesures pluviométriques aux 15 minutes apparaît plus fiable et représentatif des conditions de déclenchement des glissements de terrain si l'on se fie à la faible dispersion des données (i.e. Brunetti *et al.*, 2010; Peruccacci *et al.*, 2012; Vennari *et al.*, 2014) et au fait que les données journalières sont reconnues pour être inadéquates dans l'établissement de seuils précis et spécifiques à un site (Reichenbach *et al.*, 1998). De plus, sa position relativement élevée par rapport aux seuils établis à l'échelle régionale concorde avec les résultats obtenus par Frattini *et al.* (2009) et Guzzetti *et al.* (2007), lesquels ont compilé 124 seuils empiriques provenant de la littérature scientifique. Il est donc probable que l'urbanisation du territoire ne représente pas un facteur aussi significatif dans l'abaissement des valeurs seuils et le déclenchement de glissements de terrain tel que précédemment envisagé. Toutefois, la petite taille de l'échantillon employé, qui ne contient que 98 glissements déclenchés par les pluies, sème un doute quant à la représentativité du seuil et aux



interprétations qui en découlent. À cet égard, Peruccacci *et al.* (2012) ont déterminé qu'un minimum de 175 cas devrait être employé pour obtenir des valeurs acceptables d'incertitudes ( $<10\%$ ) et ainsi permettre l'établissement de seuils fiables. En revanche, Vennari *et al.* (2014) ont apporté un bémol à cette affirmation en démontrant que la quantité minimale de points empiriques nécessaires à l'établissement de seuils fiables varie selon les régions.

La comparaison de seuils pluviométriques établis à l'échelle locale et régionale semble indiquer que les conditions pluviométriques de déclenchement des glissements de terrain sont relativement uniformes. Toutefois, l'analyse plus détaillée des seuils proposés en fonction des différentes régions pluviométriques montre que la quantité de pluie requise pour déclencher des glissements peut varier localement en fonction des propriétés géologiques, géomorphologiques, climatiques et anthropiques. Globalement, les sols de la région semblent nécessiter un minimum de 24 mm en 120 heures et de 44 mm en 216 heures pour initier des glissements; un total qui augmente à 50 mm en 120 heures et 99 mm en 216 heures si l'on considère le seuil local établi à partir des enregistrements pluviométriques aux 15 minutes. Au-delà de 216 heures de précipitations, les valeurs seuils sont moins représentatives du fait que peu d'événements aussi longs ont été répertoriés. De manière générale, les faibles valeurs identifiées laissent présager une forte influence des précipitations antécédentes dans l'abaissement des valeurs minimales requises pour initier des glissements, tout comme elles suggèrent que certains paramètres environnementaux prédisposent les versants à l'occurrence de glissements de terrain. À cet égard, les régions densément végétalisées semblent moins susceptibles à l'occurrence de glissements alors que les zones constituées de paragneiss semblent particulièrement propices. Ces données attestent de l'importance de regrouper les secteurs d'une région non seulement en fonction de la pluviométrie, mais aussi selon les principales caractéristiques environnementales. Toutefois, les valeurs seuils proposées ne sont probablement pas exactes et représentatives des réelles conditions de déclenchement de glissements de terrain à l'échelle locale ou régionale. En effet, il semble que la cadence des enregistrements pluviométriques influe beaucoup sur l'emplacement et la fiabilité de la limite pluviométrique en affectant, entre autres, les données pluviométriques jumelées à chaque glissement. Tout compte fait, une résolution plus fine des enregistrements pluviométriques semble améliorer la fiabilité des seuils (Brunetti *et al.*, 2010; Peruccacci *et al.*, 2012; Vennari *et al.*, 2014). Par conséquent, le seuil proposé à l'échelle du centre urbain à partir de données

pluviométriques mesurées aux 15 minutes est probablement plus représentatif des conditions de déclenchement que celui établi à partir de données journalières et ce, malgré l'emploi d'un petit échantillon. Suivant cette logique, l'urbanisation ne serait donc pas un facteur aussi significatif dans l'abaissement des valeurs seuils tel que précédemment envisagé, compte tenu d'une limite seuil qui dépasserait celle proposée pour l'ensemble de la municipalité. Une inspection plus détaillée du rôle joué par les différents paramètres environnementaux sur les valeurs seuils est cependant nécessaire afin de confirmer ou infirmer cette hypothèse.

#### 5.2.1.2 Comparaison avec des seuils existants dans la littérature

Il existe un minimum de 65 seuils *ED* locaux, régionaux et globaux ayant été proposés dans littérature scientifique en date aujourd'hui. Les limites pluviométriques obtenues dans cette étude pour la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis ont donc été comparées aux principaux seuils *ED* minimums établis dans littérature pour le Brésil (tabl. 5.1), les régions tropicales et d'autres endroits à travers le monde (fig. 5.4; tabl. 5.2). Les valeurs seuils dégagées dans cette recherche ont également été comparées à d'autres types de seuil obtenus pour des localités et régions brésiliennes en combinant des mesures provenant d'événements pluviométriques spécifiques (tabl. 5.1), comme des seuils de durée-intensité (ID), des seuils basés sur les précipitations totales d'un épisode pluviométrique (E) et des seuils d'intensité de l'événement pluviométrique (EI). Dans la majorité des cas, les seuils diffèrent au niveau de la méthodologie et de l'échelle d'analyse employée, du type de mouvement considéré, de la qualité, de la représentativité et la taille de la base de données utilisée ainsi qu'au niveau des conditions climatiques, géologiques, géomorphologiques et d'occupation du sol associées aux zones étudiées. Néanmoins, la plupart sont des seuils minimums qui représentent les plus faibles valeurs pluviométriques sous lesquelles des glissements de terrain ne sont pas déclenchés, ce qui permet la comparaison directe avec ceux-ci (Aleotti, 2004, Guzzetti *et al.*, 2007, 2008; Cannon *et al.*, 2008; Dahal et Hasegawa, 2008).

D'abord, les seuils *ED* établis pour le centre urbain et la municipalité d'Angra dos Reis sont plus faibles que celui proposé par Kanji *et al.* (2003) à partir de 15 événements pluviométriques survenus entre 1967 et 2000 et ayant déclenchés des coulées de débris dans la région





mouvement de masse considéré, les coulées de débris. En effet, il est reconnu que le déclenchement de coulées de débris est généralement favorisé par des événements pluviométriques exceptionnels de courte durée et de très forte intensité (Campbell, 1975; Wieczorek, 1987; Crosta, 1998; Corominas et Moya, 1999; Polemio et Petrucci, 2000; Zêzere et Rodrigues, 2002; Wieczorek et Glade, 2005; Martelloni *et al.*, 2012). Ces écoulements requièrent des précipitations suffisamment intenses pour surpasser la capacité d'infiltration des sols et générer du ruissellement, ou des pluies modérément intenses et légèrement plus longues afin de permettre le déclenchement de glissements translationnels et leur transformation en coulées de débris (Cannon et Ellen, 1985; Wieczorek, 1987; Crosta et Frattini, 2001). Bref, cette comparaison illustre à quel point deux seuils pluviométriques développés dans la même région physiographique peuvent diverger de manière significative en fonction de la base de données employée et du type de mouvement analysé. Toutefois, des différences méthodologiques, de l'échelle d'analyse employée, des propriétés biophysiques et climatiques, etc. sont potentiellement à l'origine de cette variabilité entre les limites pluviométriques proposées.

Si l'étude de Kanji *et al.* (2003) est la seule à ce jour à avoir proposé un seuil basé sur la durée des événements pluviométriques (ED) au Brésil, il demeure que plusieurs autres chercheurs ont établi des corrélations entre les précipitations et l'occurrence de glissements de terrain (tabl. 5.1). Si la comparaison avec ces seuils est moins directe étant donné l'emploi d'une méthodologie différente, les valeurs dégagées peuvent néanmoins être mises en relation. Les valeurs seuils dégagées par les études d'Almeida *et al.* (1993) dans la région de Petrópolis, de Xavier (1996) à Belo Horizonte et de Salarori (2003) à Vitória dans l'état d'Espírito Santo s'approchent davantage de celles établies dans cette étude et ce, malgré qu'elles aient été proposées pour des régions différentes. En effet, ces seuils prévoient l'occurrence de glissements de terrain pour des événements pluviométriques cumulant plus de 30 à 40 mm en 96 heures, ce qui est très semblable à la valeur de 38 mm proposée à l'échelle locale du centre urbain (données aux 15 minutes) et légèrement plus élevé que la valeur de 18 mm liée à l'ensemble de la municipalité. Une possible explication pour cette similitude réside dans la forte urbanisation des zones étudiées, particulièrement à Belo Horizonte et Vitória, mais aussi dans le cas de la ville de Petrópolis où l'urbanisation graduelle du territoire entre 1940 et 1980 a causé un abaissement des valeurs seuils. En ce qui concerne les seuils *EI* développés par

**Tableau 5.1**  
Seuils pluviométriques pour l'occurrence de glissements de terrain au Brésil

#	Sources	Échelle	Zone d'analyse	Type de seuil	Type de glissement	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Notes
1	Guidicini et Iwasa (1977)	R	Serra do Mar	$E_{MAP}$	Min	T	$E_{MAP} < 0.08$	Pas susceptible de déclencher des glissements de terrain
2	Guidicini et Iwasa (1977)	R	Serra do Mar	$E_{MAP}$	Min	T	$0.08 < E_{MAP} < 0.12$	Faible susceptibilité de glissements de terrain (dépend des précipitations antécédentes)
3	Guidicini et Iwasa (1977)	R	Serra do Mar	$E_{MAP}$	Min	T	$E_{MAP} > 0.12$	Susceptibilité élevée de glissements de terrain (indépendamment des précipitations antécédentes)
4	Guidicini et Iwasa (1977)	R	Serra do Mar	$E_{MAP}$	Min	T	$E_{MAP} > 0.20$	Glissements de terrains de dimensions catastrophiques
5	Guidicini et Iwasa (1977)	R	Serra do Mar	E	Max	T	$R > 250-300$	
6	Nunes (1979)	L	Serra dos Orgãos (RJ)	$E_{MAP}$	Min	T	$E_{MAP(48h)} \geq 0.08$	Années humides
7	Nunes (1979)	L	Serra dos Orgãos (Rio de Janeiro)	$E_{MAP}$	Min	T	$E_{MAP(48h)} \geq 0.12$	Années sèches
8	Tatizana <i>et al.</i> (1987)	R	Cubatão (São Paulo)	EI	Min	G, É	$I = 2603E_{96h}^{-0.9333}$	Tous les glissements
9	Tatizana <i>et al.</i> (1987)	R	Cubatão (São Paulo)	EI	Min	G, É	$I = 3579E_{96h}^{-0.9333}$	Glissements de terrain épars
10	Tatizana <i>et al.</i> (1987)	R	Cubatão (São Paulo)	EI	Min	G, É	$I = 5466E_{96h}^{-0.9333}$	Glissements de terrain généralisés
11	Tatizana <i>et al.</i> (1987)	R	Cubatão (São Paulo)	EI	Min	G, É	$I = 10646E_{96h}^{-0.9333}$	Ruptures induites par les activités anthropiques
12	Jibson (1989)	R	Brésil	ID	Min	C	$I = -22.19D^{1.00} + 63.38$	Seuil adapté à la Serra do Mar
13	Jibson (1989)	R	Brésil	$I_{MAP}D$	Min	C	$I_{MAP} = -0.02D^{1.00} + 0.06$	
14	Jibson (1989)	R	Brésil	$E_{MAP}I_{MAP}$	Min	C	$I_{MAP} = 0.004E_{MAP}^{-0.92}$	Transformation des glissements en coulées

15	Elbachá <i>et al.</i> (1992)	R	Bacia do Camaragibe (Salvador)	EI	Min	G	$I = 1873.06E_{96h}^{-1.258}$	$0 < E_{96h} < 500$	Glissements seulement sur des versants très perturbés (1 à 5 glissements)
16	Almeida <i>et al.</i> (1993)	R	Petrópolis (Rio de Janeiro)	E	Min	G	$30 \text{ mm} \leq E_{96h} < 40 \text{ mm}$		Événements modérés (6 à 15 glissements)
17	Almeida <i>et al.</i> (1993)	R	Petrópolis (Rio de Janeiro)	E	Min	G	$40 \text{ mm} \leq E_{96h} < 90 \text{ mm}$		Événements à magnitude élevée (16 à 30 glissements)
18	Almeida <i>et al.</i> (1993)	R	Petrópolis (Rio de Janeiro)	E	Min	G	$90 \text{ mm} \leq E_{96h} < 150 \text{ mm}$		Événements généralisés (> 30 glissements)
19	Almeida <i>et al.</i> (1993)	R	Petrópolis (Rio de Janeiro)	E	Min	G	$E_{96h} \geq 150 \text{ mm}$		
20	Xavier (1996)	R	Horizonte (Minas Gerais) Belo	E	Min	T	$E_{96h} \geq 30 \text{ mm}$		
21	Xavier (1996)	R	Horizonte (Minas Gerais) Belo	E	Min	T	$E_{96h} \geq 50 \text{ mm}$		Nombre élevé de glissements de terrain
22	Feijó <i>et al.</i> (2001)	R	Rio de Janeiro (RJ)	E	Min	T	$E_{1h} \geq 30 \text{ mm}$ OU $E_{24h} \geq 70$ mm OU $E_{96h} \geq 100 \text{ mm}$		
23	Ortigão <i>et al.</i> (2001)	R	Rio de Janeiro (RJ)	E	Min	T	$E_{24h} > 180 \text{ mm}$		Diminution de la valeur journalière seuil en fonction des précipitations antécédentes cumulées sur 4 jours (96 h)
24	Karaji <i>et al.</i> (2003)	R	Serra do Mar	ED	Min	S	$E = 22.4D^{0.41}$	$1 < D < 10000$	
25	Salarori (2003)	L	Vitória (Espírito Santo)	E	Min	T	$E > 106.9 \text{ mm}$		Risque faible
26	Salarori (2003)	L	Vitória (Espírito Santo)	E	Min	T	$E_{96h} < 36 \text{ mm}$		
27	Salarori (2003)	L	Vitória (Espírito Santo)	E	Min	T	$36 \leq E_{96h} \leq 87.5 \text{ mm}$		Risque modéré
28	Salarori (2003)	L	Vitória (Espírito Santo)	E	Min	T	$E_{96h} > 87.5 \text{ mm}$		Risque élevé



29	Vieira (2004)	R	Blumenau (Santa Catarina)	E	Min	T	$E_{72h} \geq 50$ mm		
30	Soares (2006)	R	Angra dos Reis (Rio de Janeiro)	E	Min	T	$A_{3j} > 75$ mm ET R > 55 mm		
31	Castro (2006)	R	Ouro Preto (Minas Gerais)	E	Min	G	$A_{3j} \geq 129$ mm ET R $\geq 55$ mm		Susceptibilité élevée de glissements de terrain (> 10 glissements)
32	Parizzi et al. (2010)	R	Horizonte (Minas Gerais)	E	Min	G	$E_{24h} \geq 70$ mm		
33	Parizzi et al. (2010)	R	Horizonte (Minas Gerais)	E	Min	G	$E_{72h} \geq 100$ mm		
34	d'Orsi (2011)	L	Serra dos Órgãos (RJ)	EI	Min	T	$I = 620.7E_{24h}^{-0.71}$	$0 < E_{24h} < 180$	

*Échelle* : R, seuil régional; L, seuil local; *Type de glissement* : C, coulée de débris; E, coulée/écoulement; G, glissements (translationnels et rotationnels); GT, glissement translationnel; S = glissement de terrain superficiel (inclut C et GT); T, tous les types de rupture. *Type de seuil* : ID, durée (h) – intensité (mm/h); ED, durée de l'évènement pluviométrique; EI, intensité de l'évènement pluviométrique; E, précipitations totales de l'évènement pluviométrique; MAP, moyenne pluviométrique annuelle (mm/an); Min, seuil minimum; Max, seuil maximum.

Tableau 5.2

Seuils pluviométriques ED pour l'occurrence de glissements de terrain à travers le monde.

#	Sources	Échelle	Zone d'analyse	Type de seuil	Type de glissement	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Notes
1	Cette étude	R	Municipalité d'Angra dos Reis	Min	T	$E = -4.2 + 0.23125 * D$	$24 < D < 624$	Enregistrements pluviométriques journaliers
2	Cette étude	L	Centre urbain d'Angra dos Reis	Min	T	$E = -5.1933 + 0.2269 * D$	$24 < D < 528$	Enregistrements pluviométriques journaliers
3	Cette étude	L	Centre urbain d'Angra dos Reis	Min	T	$E = -11.181 + 0.5104 * D$	$0.25 < D < 216$	Enregistrements pluviométriques aux 15 minutes
4	Caine (1980)	G		Min	S	$E = 14.82D^{0.61}$	$0.167 < D < 500$	Glissements catastrophiques
5	Innes (1983)	G		Min	C	$E = 4.9355D^{0.5941}$	$0.1 < D < 100$	

6	Wilson <i>et al.</i> (1992)	L	Nuuanu (Hawaï; É.-U.)	Min	C	$E = 2.16D + 13.08$	$1 \leq D \leq 3$	
						$E = 3.22D + 9.91$	$3 < D \leq 6$	
7	Wilson <i>et al.</i> (1992) Wilson <i>et al.</i> (1992)	L	Kaluanui (Hawaï; É.-U.)	Min	C	$E = 12.83D + 13.84$	$1 \leq D \leq 3$	
						$E = 12.19D + 15.75$	$3 < D \leq 6$	
8	Corominas et Moya (1999)	R	Bassin versant de la rivière Llobregat (Espagne)	Min	T	$E = 0.19D + 133$	$84 < D < 1092$	Ne considère que des glissements déclenchés par des précipitations journalières supérieures à 40 mm
9	Annunziati <i>et al.</i> (2000)	L	Localité dans les Alpes apuanes (Toscane)	Min	C	$E = 22.50D + 27.50$	$1 \leq D \leq 3$	
						$E = 9.44D + 66.67$	$3 < D \leq 12$	
						$E = 1.25D + 165$	$12 < D \leq 24$	
10	Zêzere et Rodrigues (2002)	L	Région au nord de Lisbonne (Portugal)	Min	T	$E = 0.2625D + 70$	$0.1 < D < 2400$	Glissements entre 1956 et 1995
11	Zêzere et Rodrigues (2002)	L	Région au nord de Lisbonne (Portugal)	Min	T	$E = 0.306D + 104.94$	$0.1 < D < 2400$	Glissements entre 1956 et 1995
12	Kanji <i>et al.</i> (2003)	R	Serra do Mar (Brésil)	Min	S	$E = 22.4D^{0.41}$	$1 < D < 10000$	
13	Cannon <i>et al.</i> (2011)	L	Les Monts San Gabriel (Californie; É.-U.)	Min	C	$E = 0.4D^{0.5}$	$0.08 < D < 30$	Région affectée par les feux de forêts
14	Peruccacci <i>et al.</i> (2012)	R	Marches, Abruzzes et Ombrie (Italie)	Min	T	$E = 7.4D^{0.38}$	$1 < D < 1212$	
15	Peruccacci <i>et al.</i> (2012)	R	Italie	Min	T	$E = 12.2D^{0.36}$	$0.2 < D < 1440$	
16	Brunetti <i>et al.</i> (2013)	R	Calabre (Italie)	Min	S	$E = 7.85 * D^{0.43}$	$1 \leq D \leq 1080$	
17	Vennari <i>et al.</i> (2014)	R	Calabre (Italie)	Min	S	$E = 8.6 * D^{0.41}$	$0.2 \leq D \leq 451$	
18	Gariano <i>et al.</i> (2015)	R	Sicile (Italie)	Min	S	$E = 10.4 * D^{0.27}$	$0.2 \leq D \leq 1440$	

*Échelle* : G, *Global*; R, seuil régional; L, seuil local; *Type de glissement* : C, coulée de débris; S = glissement de terrain superficiel (inclut C et glissements translationnels); T, tous les types de glissement. *Types de seuil* : Min, seuil minimum.

Tatizana *et al.* (1987) dans la Serra do Mar et par d'Orsi (2011) pour la Serra dos Orgãos (compris dans la Serra do Mar), ils diffèrent considérablement alors que pour des précipitations cumulées de 40 mm sur quatre jours, soit approximativement la valeur dégagée à l'échelle du centre urbain (enregistrements aux 15 minutes), des intensités minimales de 83-90 mm/h sont requises pour déclencher des glissements, ce qui est très peu probable malgré des précipitations très intenses lors de la période estivale. Enfin, plusieurs autres recherches réalisées au Brésil ont également proposé des valeurs seuils plus élevées que celles établies dans cette étude. Cette situation est en grande partie imputable à l'absence de registres compilant systématiquement les glissements de terrain déclenchés dans les différentes régions brésiliennes et les totaux pluviométriques associés, ce qui restreint plus souvent qu'autrement les chercheurs à utiliser des événements majeurs recensés dans les journaux et rapports scientifiques (Guidicini et Iwasa, 1977; Kanji *et al.*, 2003). Par conséquent, ces seuils représentent davantage des seuils maximaux que minimaux.

Il est reconnu dans la littérature scientifique que chaque région ou localité à travers le monde est en équilibre dynamique avec les conditions pluviométriques (Guidicini et Iwasa, 1977; Govi et Sorzana, 1980; Cannon, 1988; Bacchini et Zannoni, 2003; Aleotti, 2004; Giannechini, 2006). Ainsi, on assume que les régions caractérisées par une forte pluviosité annuelle nécessitent davantage de pluie pour générer des glissements de terrain en raison d'une conductivité hydraulique élevée des sols par comparaison aux régions ayant une faible pluviosité annuelle (Guidicini et Iwasa, 1977; Innes, 1983). Le type de climat est donc un paramètre qui influence grandement les limites pluviométriques associées au déclenchement de glissements de terrain. Les seuils de cette étude ont donc été comparés aux deux seuils proposés par Wilson *et al.* (1992) dans deux localités d'Hawaï aux États-Unis possédant un climat tropical similaire (Aw selon la classification de Köppen-Geiger) (fig. 5.4; #6-7). À cet égard, les limites établies par les auteurs pour la localité de Nuuanu et Kaluanui prévoient l'occurrence de coulées de débris pour des précipitations aussi courtes que six heures et des valeurs cumulées respectives de 29 et 89 mm. Ces seuils particulièrement courts et élevés par comparaison à Angra dos Reis sont essentiellement dus au type de mouvement considéré par l'étude. Tel qu'expliqué précédemment, l'occurrence de coulées de débris est essentiellement le résultat de précipitations très intenses dans un court laps de temps (Wieczorek et Glade, 2005). L'étude de Wilson *et al.* (1992) est tout de même pertinente au sens où elle démontre à



quel point les valeurs pluviométriques seuils peuvent varier d'une localité à l'autre et ce, malgré des contextes climatiques similaires. D'autres seuils *ED* développés dans des régions tropicales sont toutefois nécessaires afin de permettre une meilleure évaluation de l'influence du contexte climatique dans l'établissement de seuils pluviométriques liés à l'occurrence de glissements de terrain.

Enfin, les principaux seuils *ED* globaux, régionaux et locaux proposés dans la littérature scientifique ont été mis en relation avec les seuils de cette étude (fig. 5.4; tabl. 5.2). De manière générale, les seuils développés pour la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis sont plus faibles que tous les seuils établis pour des durées inférieures à 72 heures, à l'exception du seuil proposé par Cannon *et al.* (2011) dont la fenêtre temporelle ne couvre que 24 heures de précipitations. Dans un premier temps, les valeurs très faibles obtenues par Cannon *et al.* (*Ibid.*) et comparables à celles de cette étude sont dues à l'analyse de coulées de débris dans un environnement récemment brûlés. Si les coulées requièrent généralement des précipitations très intenses sur une courte période pour se déclencher, les incendies de forêts tendent à réduire le volume, l'intensité et la durée des précipitations nécessaires au déclenchement de coulées de débris en modifiant les conditions d'infiltration et d'écoulement des sols (Cannon et Gartner, 2005). En fait, les feux produisent une couche de sol hydrophobe sous-jacente et parallèle à la surface incendiée qui, couplée à la perte de couverture végétale, réduit la capacité d'infiltration, augmente l'écoulement de surface (et le pouvoir érosif de l'eau) et favorise l'effilochement superficiels des sols meubles (Wieczorek, 1996). De plus, la formation de coulées de débris tend également à être facilitée lors des premiers orages suivant les incendies en raison d'une disponibilité accrue en sédiments (Cannon *et al.*, 2008). Cela dit, ces conditions ne sont pas présentes à Angra dos Reis et ne permettent pas d'expliquer les faibles valeurs dégagées. Dans un second temps, les basses limites pluviométriques *ED* établies dans cette étude laisse présager une très faible fiabilité et représentativité pour des précipitations de courtes durées (<72 h). À ce propos, l'emploi d'une base de données imposante qui ne fait pas de distinction en ce qui a trait au volume des glissements ainsi qu'à une date associée aux cas rapportés qui n'est peut être pas toujours représentative de la date réelle de déclenchement sont peut être des facteurs explicatifs. Les propriétés biophysiques qui affectent localement la stabilité des sols dans la municipalité d'Angra dos Reis et qui réduisent la quantité de pluie requise pour initier des glissements de terrain sont aussi à considérer. En ce qui concerne les durées plus longues

que 72 heures, les valeurs obtenues pour le centre urbain à partir de données pluviométriques aux 15 minutes sont très similaires à celles dégagées par Peruccacci *et al.* (2012), Brunetti *et al.* (2013), Vennari *et al.* (2014) et Gariano *et al.* (2015) pour une partie et l'ensemble de l'Italie. Cette similitude est peut-être liée à la forte pluviosité montagnaise qui peut atteindre les valeurs enregistrées dans le sud-est brésilien (2000 mm) en raison de l'orientation des courants atmosphériques qui engendrent d'importantes précipitations orographiques (Vennari *et al.*, 2014); les régions à pluviosité annuelle similaire ont généralement des valeurs de déclenchement analogues (Guidicini et Iwasa, 1977; Innes, 1983). En ce qui a trait aux seuils n'ayant pas été abordé précédemment et qui montrent des valeurs approximativement deux à quatre fois plus élevées que celles obtenues dans cette étude à l'échelle locale du centre urbain (données aux 15 minutes), il semble que ce soit essentiellement dû à au type de mouvement considérée, soit les coulées de débris pour les études de Innes (1983) et Annunziati *et al.* (2000), à une échelle locale d'analyse qui tend à rehausser les seuils dans les cas d'Annunziati *et al.* (2000) et Zêzere *et al.* (2002), ainsi qu'à la base de données employée qui inclut principalement des événements catastrophiques dans les cas de Caine (1980), Corominas et Moya (1999) et Zêzere *et al.* (2002); i.e. les seuils ne représentent pas nécessairement des limites minimales de déclenchement (Reichenbach *et al.*, 1998; Guzzetti *et al.*, 2007; 2008).

Somme toute, les limites pluviométriques proposées dans cette étude pour la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis semblent avoir été sous-estimé lorsque comparées à la majorité des limites pluviométriques développées dans la littérature scientifique. Toutefois, trop de disparités existent entre les seuils sur le plan méthodologique, de la base de données utilisée, de l'échelle d'analyse, du type de mouvement considérée, des caractéristiques biophysiques, etc., ce qui rend inévitablement plus difficile les interprétations qui découlent et des comparaisons. À cet égard, les valeurs seuils dégagées par certains auteurs ayant étudié l'occurrence de glissements de terrain au Brésil (Almeida *et al.*, 1993; Xavier, 1996; Salarori, 2003) remet en perspective l'idée d'une sous-estimation des limites pluviométriques et laisse présager des valeurs qui s'approchent réellement des conditions de déclenchement et ce, spécialement pour des précipitations dont la durée est de 96 heures. Il est toutefois possible que les faibles limites pluviométriques soient liées à des conditions géologiques, géomorphologiques et d'occupation du sol uniques à la région d'Angra dos Reis et qui affectent localement la stabilité des sols, réduisant de surcroît la quantité de pluie requise pour initier

des glissements de terrain. À cet égard, il est probable que l'urbanisation et les activités anthropiques associées représentent un facteur prépondérant dans l'abaissement des limites pluviométriques. Les faibles valeurs obtenues sont peut-être aussi liées au fait que cette étude considère tous les types de glissements et non seulement les coulées de débris ou les glissements superficiels. Les sols étant très épais par endroit dans la municipalité d'Angra dos Reis, il est possible que plusieurs cas compilés dans le registre soient associés à des ruptures très profondes qui sont généralement influencées par les précipitations antécédentes, ce qui réduit inévitablement les valeurs pluviométriques événementielles et journalières de déclenchement (Campbell, 1975, Cannon et Ellen, 1985; Aleotti, 2004; Nadim *et al.*, 2009).

### 5.2.2 Conditions *E-D* probabilistes

L'analyse par régression logistique permet l'évaluation des probabilités conditionnelles d'un événement pluviométrique compte tenu de la présence conjointe de deux variables de contrôles. Cette approche est particulièrement avantageuse du fait qu'elle considère à la fois les événements ayant déclenché des glissements et ceux n'en ayant pas déclenché, ce qui permet d'exprimer les incertitudes sous forme de probabilités. Dans ce cas-ci, ce sont les mêmes variables utilisées lors de l'analyse par seuils *ED*, soit les précipitations cumulées (*E*) et la durée (*D*) des événements pluviométriques, qui ont été employées afin de déterminer les probabilités d'occurrence ou de non-occurrence des glissements de terrain. Il est important de mentionner que les valeurs calculées ne sont qu'une approximation de la vraie probabilité d'occurrence d'un glissement lors d'événements pluviométriques étant donné que le registre historique des glissements de terrain compilé par la Défense Civile d'Angra dos Reis est incomplet, plusieurs cas n'ayant probablement pas été répertoriés en raison de leur déclenchement dans des zones éloignées et inhabitées.

Dans un premier temps, les modèles analysés se sont tous avérés significatifs, tout comme les variables *E* et *D* intégrées, indiquant que des changements dans la valeur de ces variables prédictives engendrent un changement de réponse (occurrence ou non-occurrence de glissements). Une exception émane toutefois du modèle développé à l'échelle locale du centre urbain à partir des enregistrements pluviométriques journaliers où une valeur *p* de 0,079 est associée à la variable *D*, indiquant que des changements dans la durée de précipitations



n'affectent pas l'occurrence des glissements. Lorsque plusieurs variables prédictives sont considérées (ex. intensité, durée, précipitations cumulées, etc.), ceci indique qu'il est préférable d'exclure cette variable du modèle au profit d'une variable plus significative. Dans le cadre de cette étude qui ne considère que les variables *E* et *D*, la variable *a* néanmoins été conservée en raison de l'absence d'autres variables pouvant être incluses dans le modèle; l'objectif étant uniquement d'évaluer le rôle des variables *E* et *D* dans l'établissement de probabilités d'occurrence des glissements de terrain dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis.

Dans un second temps, les valeurs exponentielles des variables prédictives dégagées pour les différents modèles probabilistes montrent que l'impact des variables sur les prédictions varie en fonction de l'échelle d'analyse. Pour les précipitations cumulées lors d'un événement pluviométrique, l'impact est relativement semblable d'une échelle à l'autre, un accroissement de la valeur de *E* affecte positivement les probabilités d'occurrence. À cet égard, il semble que les précipitations cumulées aient plus d'impact à l'échelle locale du centre urbain par comparaison à l'ensemble de la municipalité d'Angra dos Reis. Plus précisément, une augmentation d'un millimètre de pluie événementielle résulte en une augmentation des probabilités de déclenchement de 0,5 % à l'échelle régionale par comparaison à 1-1,5 % à l'échelle locale et ce, pour une durée pluviométrique constante. En ce qui concerne la durée des épisodes pluviométriques, l'interprétation des résultats est plus complexe. En effet, la variable *D* a une légère influence positive à l'échelle régionale de la municipalité et une forte influence positive à l'échelle locale du centre urbain pour la période s'étendant du 18 mai 2011 au 30 juin 2013, tandis qu'à la même échelle, mais pour l'ensemble de la période janvier 2008 à mars 2013, son impact est légèrement négatif. De manière générale, il semble donc que ce sont les précipitations cumulées qui influencent le plus les probabilités d'occurrence, l'impact de la durée étant quant à elle très variable en fonction de la zone analysée, affectant à la fois négativement et positivement les probabilités de déclenchement. Néanmoins, les résultats obtenus corroborent ceux mentionnés dans la littérature scientifique (Guzzetti *et al.*, 2008; Berti *et al.*, 2012; Peruccacci *et al.*, 2012), à savoir que l'intensité (*I*) et les précipitations cumulées lors d'événements pluviométriques (*E*) sont des variables plus significatives que la durée des précipitations (*D*) pour déterminer si des événements pluviométriques déclencheront ou non des glissements de terrain.

En ce qui a trait aux probabilités dégagées à partir des fonctions logistiques obtenues par l'intégration des coefficients de régression associés aux variables prédictives  $E$  et  $D$ , elles montrent que la capacité de discriminer un événement déclencheur d'un événement non-déclencheur augmente à l'échelle du centre urbain (données aux 15 minutes) et de la municipalité d'Angra dos Reis en fonction d'un accroissement des précipitations cumulées et de la durée des événements pluviométriques, tandis qu'elle croît rapidement à l'échelle locale (données journalières) en fonction des précipitations cumulées et décroît lentement selon la durée événementielle. À cet égard, la capacité prédictive augmente beaucoup plus rapidement en fonction de  $E$  et  $D$  à l'échelle locale du centre urbain (données aux 15 minutes) par comparaison à l'échelle régionale. En effet, l'incertitude liée à la prédiction d'événement déclencheur est inférieure à 5 % pour des précipitations supérieures à 180 mm en 48 heures et 99 mm en 216 heures, alors qu'à l'échelle régionale, les valeurs sont deux et trois fois plus élevées pour des durées identiques. Ces valeurs pluviométriques associées à de très faibles incertitudes prédictives s'approchent par ailleurs davantage des fortes valeurs établies dans la littérature scientifique pour des environnements brésiliens (Guidicini et Iwasa, 1977; Nunes, 1979; Kanji *et al.*, 2003). Ainsi, il est probable que ces seuils représentent davantage des limites pluviométriques maximales plutôt que minimales et ce, possiblement en raison de l'utilisation d'un registre comprenant essentiellement des événements pluviométriques majeurs. En ce qui concerne les données  $E$ - $D$  liées à de plus faibles probabilités, les deux modèles concordent et indiquent qu'il est très difficile de prédire avec certitude l'occurrence d'événement déclencheur ou non-déclencheurs lors de précipitations cumulant moins de 75 mm en 24 heures et 40 mm en 48 heures. En ce qui a trait aux probabilités obtenues à l'échelle locale, mais à partir de données journalières, elles montrent une capacité prédictive particulièrement élevée aussitôt que la limite  $ED$  est franchie. À cet effet, l'aire associée à une prédiction dont la confiance est supérieure à 95 % est beaucoup plus imposante à cette échelle, des glissements étant quasi-certains de se produire lors de précipitations cumulant plus ou moins 100 mm et ce, indépendamment de la durée. Bref, les incertitudes liées à la discrimination des événements pluviométriques déclencheurs et non-déclencheurs sont beaucoup plus faibles à l'échelle du centre urbain par comparaison à l'ensemble de la municipalité et ce, pour toutes les durées considérées. De plus, il semble que les valeurs  $E$ - $D$  permettant de prédire avec conviction l'occurrence de glissements de terrain (>95 %) s'approchent davantage des valeurs seuils

proposés dans la littérature, ce qui laisse entrevoir une sous-estimation des seuils *ED* minimaux proposés dans cette étude et/ou une surestimation des limites pluviométriques par les différents chercheurs ayant étudiés la relation entre les précipitations et le déclenchement de glissements de terrain en raison de l'emploi d'une base de données comportant des événements catastrophiques.

Enfin, la capacité prédictive des modèles a été évaluée à l'aide d'un tableau de contingence à classification binaire (tabl. 5.3) permettant une validation croisée des événements susceptibles ou non de déclencher des glissements de terrain où quatre issues différentes sont possibles; l'occurrence d'évènement est soit vraie (V) ou fausse (F), et les prédictions du modèle sont soient positives (P, prédiction réussie) ou négatives (N, prédiction erronée). Ainsi, un *vrai positif* (VP) est une donnée empirique (*E*, *D*) localisée au-dessus du seuil et qui a résulté en un glissement de terrain, tandis qu'un *vrai négatif* (VN) est un point empirique (*E*, *D*) n'ayant pas déclenché de glissement. En contrepartie, les *faux positifs* (FP) surviennent lorsque les conditions pluviométriques *E-D* surpassent le seuil et que des glissements ne se produisent pas (ou ne sont pas notifiées), alors que les *faux négatifs* (FN) surviennent lorsque des conditions *E-D* se situent sous le seuil pluviométrique et que des glissements sont déclenchés. Dans le cadre de cette recherche, les résultats montrent que tous les modèles peuvent prédire l'occurrence ou la non occurrence de glissements avec une fiabilité supérieure à 60 %, mais que c'est le modèle développé à l'échelle locale du centre urbain à partir de données pluviométriques aux 15 minutes qui possède la meilleure capacité prédictive (82,83 %). Ceci est sans doute lié à la base de données réduite et l'utilisation de données pluviométriques plus précises à cette échelle qui facilite la discrimination des événements. Les événements déclencheurs sont moins bien prédits que les événements non-déclencheurs et ce, à toutes les échelles. Ceci est dû à l'utilisation d'un seuil minimum qui augmente le nombre de *fausses alertes* (FP) et diminue le nombre de *vrais négatifs* (VN) (Peruccacci *et al.*, 2012). De plus, les pourcentages de prédictions correctes sont probablement surestimés pour les événements déclencheurs en raison d'un manque d'information, particulièrement sur un grand territoire comme celui d'Angra dos Reis où un registre exhaustif et complet est difficile, voire impossible, à obtenir (Staley *et al.*, 2012). Somme toute, le nombre élevé de fausses prédictions, particulièrement en ce qui a trait au nombre de *fausses alertes* (FP), restreint l'intégration de ces modèles dans des systèmes de surveillance et d'alerte des glissements de



terrain. En effet, lors de l'implantation d'un tel système ce sont les *fausses alertes* (FP) et les *alertes manquées* (FN) que l'on tente de minimiser (Berti *et al.*, 2012). Néanmoins, les modèles développés pourraient être raffinés par l'intégration régulière de nouvelles données portant sur les glissements de terrain déclenchés lors d'événements pluviométriques. De la sorte, cette méthode serait avantageuse pour les gestionnaires du territoire étant donné que les probabilités d'occurrence peuvent être mises à jour au fur et à mesure que nouvelles données sont disponibles, ce qui en fait une méthode adaptée à la prise de décision où il est généralement essentiel de considérer le coût des alertes manquées (faux négatifs) et des fausses alertes (faux positifs) (Berti *et al.*, 2012).

		Événements prévus	
		0 = non-déclencheur	1 = déclencheur
		VN	FN (alertes manquées)
Événements observés	0 = non-déclencheur		
	1 = déclencheur	FP (fausses alertes)	VP

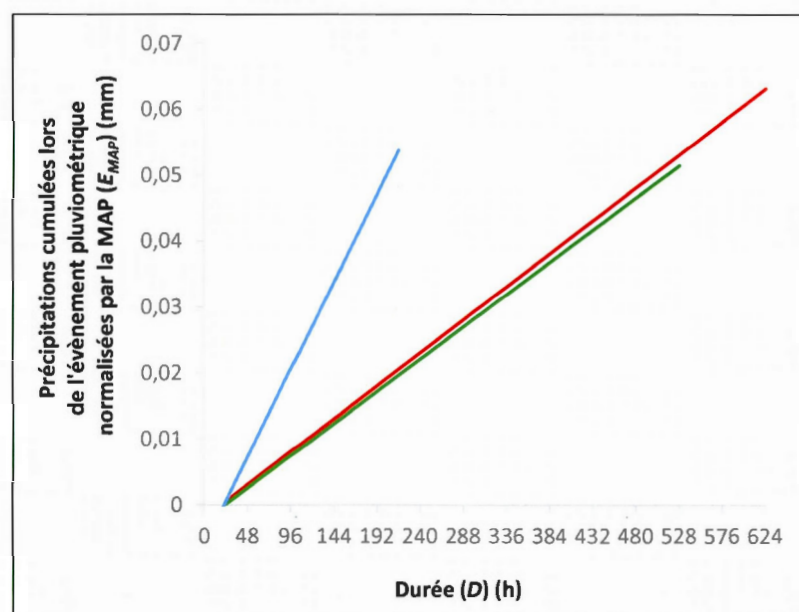
**Tableau 5.3** Tableau de contingence illustrant les quatre résultats issus d'un modèle de classification binaire.

### 5.2.3 Conditions *E-D* normalisés par la *MAP*

Un des inconvénients des seuils *ED* est qu'ils sont définis pour des zones et des régions spécifiques et, par conséquent, s'avèrent difficilement exportables à des régions avoisinantes et des zones similaires (Crosta, 1990). En plus des différences lithologiques et géomorphologiques qui peuvent exister entre les sites, la variabilité météorologique et climatique n'est pas prise en considération dans les seuils *ED* déterminés par l'étude d'événements pluviométriques singuliers (Guzzetti *et al.*, 2007). Une façon commune de les rendre comparables consiste à normaliser les totaux pluviométriques en utilisant des mesures empiriques du climat local (Guidicini et Iwasa, 1977; Govi et Sorzana, 1980; Cannon et Ellen, 1985; Cannon, 1988; Bacchini et Zannoni, 2003; Aleotti, 2004; Giannecchini, 2006; Giannecchini *et al.*, 2012), telles que la moyenne pluviométrique annuelle (*MAP*).

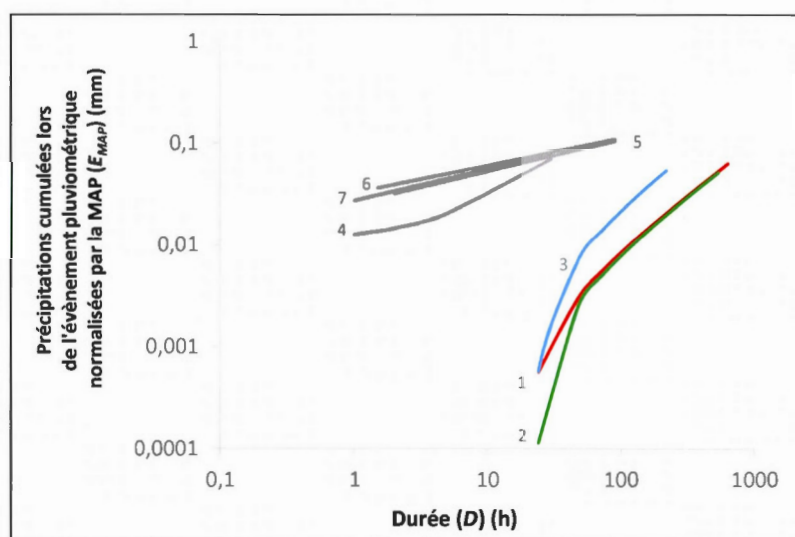
Dans un premier temps, les seuils *ED* normalisés par la *MAP* ( $E_{MAPD}$ ) et proposés dans cette étude ont été comparés entre eux (fig. 5.5) afin de déterminer si la normalisation a permis de

réduire significativement l'écart entre les droites, soit la quantité de pluie requise pour déclencher des glissements de terrain lors d'un évènement pluviométrique. De manière générale, la normalisation par la *MAP* des précipitations cumulées lors d'un évènement pluviométrique n'a pas changée de manière significative les tendances seuils dégagées. La normalisation des données donne un aperçu du pourcentage de pluie recueillie annuellement requis pour initier des glissements dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis. Il semble que seulement 1 % de la *MAP* est nécessaire pour déclencher des glissements à l'échelle locale et régionale d'Angra dos Reis lors d'évènements pluviométriques d'une durée inférieure à 120 heures, un ratio qui augmente à plus de 3 % pour des précipitations qui s'étendent sur plus de 13-14 jours (312-336 heures). Concernant le seuil dégagé à l'échelle du centre urbain à partir des enregistrements pluviométriques aux 15 minutes, la proportion de la *MAP* requise pour déclencher des glissements augmente beaucoup plus rapidement en fonction de la durée des évènements : >1 % pour 58 heures de précipitations, >2 % pour 95 heures, >3 % pour 131 heures, >4 % pour 167 heures et >5 % pour 203 heures.



**Figure 5.5** Comparaison des seuils  $E_{MAPD}$  minimum (5 %) établis pour la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes). Rouge : municipalité d'Angra dos Reis; Vert : centre urbain (données journalières); Bleu : centre urbain (données aux 15 minutes).

Dans un second temps, les seuils  $E_{MAP}D$  établis dans cette étude ont été comparés à des seuils similaires proposés dans la littérature scientifique (fig. 5.6; tabl. 5.4). Globalement, les valeurs normalisées dégagées pour le centre urbain et la municipalité d'Angra dos Reis sont significativement plus faibles que toutes celles recensées dans la littérature. À cet égard, les ratios proposés par Giannecchini (2006) et Giannecchini *et al.* (2012) en Toscane sont environ 10 fois plus élevés. Selon ces auteurs, les seuils obtenus sont particulièrement élevés en raison de la forte moyenne pluviométrique annuelle de ces localités qui avoisine les 1900 mm. Considérant la forte  $MAP$  également associée au secteur de la municipalité d'Angra dos Reis et les faibles coefficients de détermination ( $R^2$ ) obtenus, il est fort probable que d'autres facteurs permettent d'expliquer les faibles seuils dégagés dans cette étude. Il est néanmoins pertinent de mentionner que les seuils de Giannecchini (2006) et Giannecchini *et al.* (2013) ont été développés pour des glissements superficiels qui sont habituellement déclenchés par de courtes précipitations très intenses (Campbell, 1975; Wieczorek, 1987; Crosta, 1998; Corominas et Moya, 1999; Polemio et Petrucci, 2000; Zêzere et Rodrigues, 2002; Martelloni *et al.*, 2012), ce qui inévitablement rehausse les valeurs seuils par comparaison à cette étude



**Figure 5.6** Comparaison des seuils  $E_{MAP}D$  minimum (5 %) établis dans cette étude et dans la littérature scientifique. *Légende* : Ligne grise, seuils locaux; Rouge, municipalité d'Angra dos Reis; Vert, centre urbain (données journalières); Bleu, centre urbain (données aux 15 minutes). *Sources* (les numéros font références aux # du tableau 5.3) : 1-3, cette étude; 4, Giannecchini (2006); 5-7, Giannecchini *et al.* (2012).



**Tableau 5.4**  
Seuils pluviométriques  $E_{MAPD}$  pour l'occurrence de glissements de terrain à travers le monde.

#	Sources	Échelle	Zone d'analyse	Type de seuil	Type de glissement	Seuil	Fenêtre temporelle (h)	Notes
1	Cette étude	R	Municipalité d'Angra dos Reis	Min	T	$E_{MAP} = -0.0019 + 0.0001 * D$	$24 < D < 624$	Enregistrements pluviométriques journaliers
2	Cette étude	L	Centre urbain d'Angra dos Reis	Min	T	$E_{MAP} = -0.0023 + 0.0001 * D$	$24 < D < 528$	Enregistrements pluviométriques journaliers
3	Cette étude	L	Centre urbain d'Angra dos Reis	Min	T	$E_{MAP} = -0.0061 + 0.0003 * D$	$0.25 < D < 216$	Enregistrements pluviométriques aux 15 minutes
4	Giannecchini (2006)	L	Alpes apuanes (Toscane - Italie)	Min	S	$E_{MAP} = 0.1974D + 1.0711$	$1 < D < 30$	
5	Giannecchini et al. (2012)	L	Vallée de la Rivière Serchio , (Toscane - Italie)	Min	S	$E_{MAP} = 2.59D^{0.31}$	$2 < D < 90$	Pluviomètres Borgo et Mozzano
6	Giannecchini et al. (2012)	L	Vallée de la Rivière Serchio (Toscane - Italie)	Min	S	$E_{MAP} = 3.26D^{0.27}$	$1.5 < D < 90$	Pluviomètre Multigliano
7	Giannecchini et al. (2012)	L	Vallée de la Rivière Serchio (Toscane - Italie)	Min	S	$E_{MAP} = 2.73D^{0.31}$	$1 < D < 80$	Pluviomètre Vinchiana

*Échelle* : R, seuil régional; L, seuil local; *Type de glissement* : C, coulée de débris; S = glissement de terrain superficiel (inclut C et glissements translationnels); T, tous les types de rupture. *Type de seuil* : Min, seuil minimum.

qui considère tous les types de glissements, y compris les mouvements profonds qui sont plutôt associés à une percolation lente de l'eau de pluie ou une augmentation constante de la nappe phréatique résultant de précipitations antécédentes et actuelles de longues durées et de faibles intensités (Larsen et Simon, 1993; Guzzetti *et al.*, 2007; Marques *et al.*, 2008).

Enfin, lorsque comparé aux seuils  $E_{MAP}$  brésiliens développés par Guidicini et Iwasa (1977) dans la Serra do Mar et par Nunes (1979) dans la Serra dos Orgãos (tabl. 5.1), les limites de cette étude demeurent relativement faibles. En effet, même pour des événements pluviométriques dont la durée atteint 624 heures dans la municipalité d'Angra dos Reis, seulement 6 % de la MAP est requis pour déclencher des glissements. Ce ratio demeure particulièrement bas et correspond à une pluviosité événementielle que Guidicini et Iwasa (1997) et Nunes (1979) considèrent insuffisante pour déclencher des glissements de terrain. Ainsi, une étude plus approfondie de l'influence des paramètres environnementaux sur les limites pluviométriques à l'échelle de la municipalité du centre urbain d'Angra dos Reis devrait permettre d'identifier certains facteurs à l'origine de ces faibles valeurs seuils.

#### 5.2.4 Influence des facteurs environnementaux

Il est largement reconnu que le déclenchement des glissements de terrain est influencé par différents facteurs géologiques, géomorphologiques, biophysiques et anthropiques (Wieczorek, 1996; Highland et Bobrowsky, 2008). Compte tenu des faibles valeurs pluviométriques  $ED$  et  $E_{MAPD}$  associées à l'occurrence de glissements de terrain dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis par comparaison à celles proposées dans la littérature pour d'autres localités et régions à travers le monde, il est fort probable que des paramètres statiques et inhérents tels que la lithologie, l'occupation du sol, l'inclinaison des pentes et leur orientation aient une influence sur la stabilité des versants en prédisposant certains secteurs plus que d'autres à des ruptures et en agissant comme catalyseurs afin de permettre aux précipitations d'opérer plus efficacement (Fernandes *et al.*, 2004; Glade et Crozier, 2005). À cet égard, l'analyse de la dynamique spatio-temporelle des glissements a démontré que l'occurrence de glissements de terrain semble être particulièrement propice dans les zones urbaines, les pentes orientées vers le sud et dans les secteurs constitués d'orthogneiss et de dépôts alluviaux et fluvio-marins (DAFM). Toutefois, l'impact réel des différentes

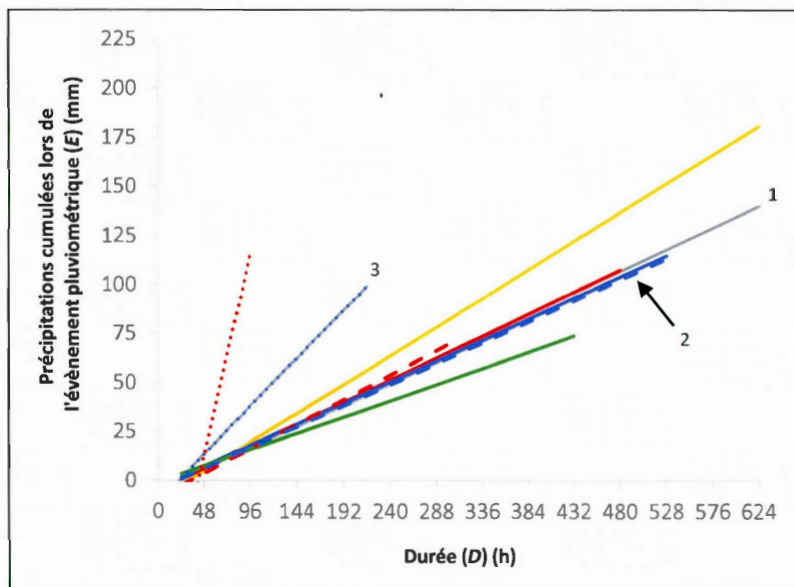
composantes environnementales dans l'abaissement ou le rehaussement des limites pluviométriques reste à parfaire.

#### 5.2.4.1 Lithologie

D'abord, la comparaison des seuils développés pour les différents domaines lithologiques dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis (fig. 5.7) montre que les orthogneiss et les granites n'ont pas d'influence sur l'emplacement des limites pluviométriques. En effet, les valeurs des paramètres empiriques  $\alpha$  et  $\beta$  dérivés pour les orthogneiss et les granites sont pratiquement identiques à ceux des seuils *ED* développés à des échelles similaires. Ceci est particulièrement frappant à l'échelle locale (enregistrements aux 15 minutes) où le seuil associé aux orthogneiss est indiscernable du seuil *ED* qui, pourtant, diffère grandement des limites locales et régionales développés à partir des données journalières. À cet égard, seule la droite établie pour les granites à l'échelle locale à partir d'enregistrements pluviométriques aux 15 minutes s'éloigne de manière significative du seuil *ED* correspondant. Toutefois, la limite pluviométrique n'est pas fiable étant donné que seulement 22 cas ont été utilisés pour établir le seuil et que, selon Peruccacci *et al.* (2012), un minimum de 75 glissements est nécessaire afin de définir des seuils pluviométriques fiables et représentatifs des conditions de déclenchement.

En ce qui concerne les paragneiss et DAFM, leur influence est négligeable pour des précipitations dont la durée est inférieure à 96 heures, mais augmente légèrement en fonction d'un allongement des épisodes pluvieux. Plus spécifiquement, les DAFM requièrent environ 1,5 fois plus de précipitations que les paragneiss et 1,2 fois plus que les orthogneiss et granites pour déclencher des glissements de terrain lors d'évènements pluviométriques à durée égale. Ceci laisse entrevoir des propriétés hydrologiques propres aux paragneiss et aux DAFM qui influencent de manière différente l'infiltration et le drainage de l'eau pluviale, et inévitablement la vitesse de saturation des sols, particulièrement à long terme. Concernant les DAFM, il est probable que la nature non consolidée du matériel, composée essentiellement de matériel détritique, favorise davantage la mobilisation des sédiments sous forme de coulée de débris dont l'occurrence est généralement associée à d'intenses précipitations de courtes durées





**Figure 5.7** Seuils *ED* minimums (5 %) établis pour divers domaines lithologiques dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes). *Lignes* : seuils régionaux; *Tirets* : seuils locaux (données journalières); *Pointillés* : seuils locaux (données aux 15 minutes); *Jaune* : dépôts alluviaux et fluvio-marins; *Rouge* : granite; *Bleu* : orthogneiss; *Vert* : paragneiss; *Gris* : seuils *ED* établis dans cette étude; *Numéros* : 1, municipalité d'Angra dos Reis; 2, centre urbain (données journalières); 3, centre urbain (données aux 15 minutes).

(Wieczorek et Glade, 2005). De plus, ces dépôts requièrent possiblement plus de précipitations intenses pour initier des glissements de terrain en raison de la forte perméabilité du matériel non consolidée qui facilite le drainage rapide de l'eau en profondeur et réduit la possibilité de saturation à long terme (Campbell, 1975; Brand *et al.*, 1984; Wieczorek, 1987; Au, 1998; Crosta, 1998; Corominas et Moya, 1999; Polemio et Petrucci, 2000; Zêzere et Rodrigues, 2002; Gabet *et al.*, 2004; Martelloni *et al.*, 2012). Pour les paragneiss, leur origine sédimentaire est possiblement responsable de la faible limite pluviométrique, la résistance des roches sédimentaires étant généralement très faibles par comparaison aux roches ignées (Nadim *et al.*, 2006). De plus, les structures linéaires qui caractérisent les paragneiss de la région les rendent particulièrement apte à l'occurrence de glissements de terrain (Tricart, 1979). Ces caractéristiques lithologiques laissent ainsi entrevoir une susceptibilité aux glissements de terrain plus élevée dans le nord de la municipalité où les roches sont composées en majeure partie de paragneiss, ce qui expliquerait, en partie du moins, le faible seuil pluviométrique

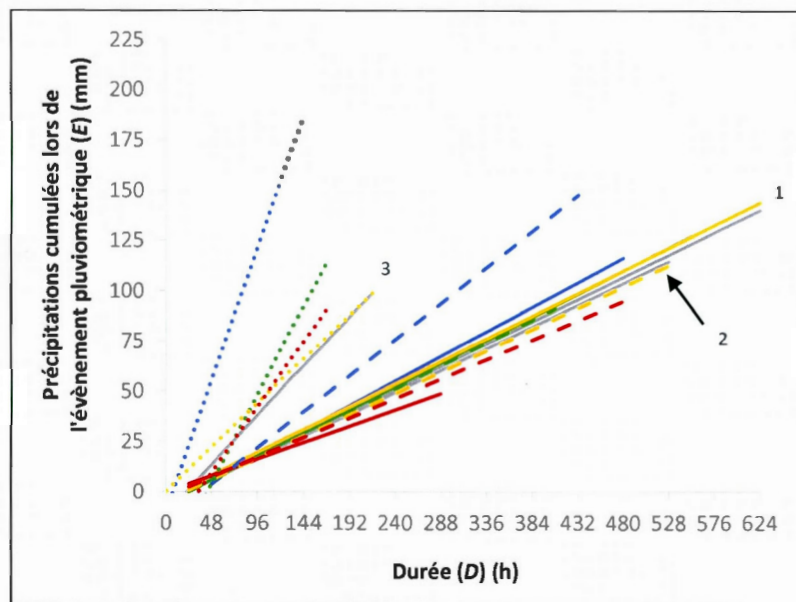
associé à la région *Bracuí*, où 43 % des glissements ont été initiés dans les paragneiss. À l'inverse, la plus forte limite pluviométrique des DAFM explique les seuils plus élevés établis dans les régions *Mambucaba*, *Jacuecanga* et *Japuiba* (et *Serra D'água*, quoique le seuil n'est pas fiable), où ces dépôts couvrent une bonne proportion du territoire.

Bref, le déclenchement de glissements de terrain dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis semble indépendant de la lithologie pour des événements pluviométriques de moins de quatre jours. Cependant, plus la durée des événements s'allonge (>96 h), plus il apparaît évident que les propriétés intrinsèques des DAFM et des paragneiss jouent un rôle dans la saturation des sols et influence les limites pluviométriques associées au déclenchement subséquent des glissements, ce qui n'est pas le cas des orthogneiss et des granites. Plus précisément, il semble que la forte capacité de drainage associée à la nature non consolidée et détritique du matériel composant les DAFM favorise le déclenchement de glissements de terrain lors des événements pluviométriques plus intenses mais de courte durée par comparaison aux autres domaines considérés. En contrepartie, l'origine sédimentaire des paragneiss et les structures linéaires associées au métamorphisme de ces roches semblent favoriser une faible limite pluviométrique.

#### 5.2.4.2 Inclinaison des pentes

En ce qui a trait à la mise en relation des seuils *ED* développés pour diverses catégories d'inclinaison des pentes (fig. 5.8), elle indique que la durée et la quantité de pluie événementielle requise pour déclencher des glissements de terrain ne sont pas influencées par la pente, tant à l'échelle locale du centre urbain qu'à l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis. En effet, les seuils développés pour les différentes inclinaisons ne diffèrent pas significativement des seuils *ED* locaux et régionaux. Ceci est surprenant, sachant que l'inclinaison des pentes a généralement un impact significatif sur la fréquence des glissements de terrain (Cruz, 1974; Larsen et Torres-Sánchez, 1998; Fernandes *et al.*, 2004) et qu'elle peut influencer, dans une certaine mesure, les valeurs pluviométriques seuils (Akcali *et al.*, 2010). À cet égard, l'étude d'Akcali *et al.* (*Ibid.*) réalisée en Turquie indique que les seuils pluviométriques peuvent bel et bien varier en fonction de la pente. Les auteurs mentionnent

que des précipitations plus intenses sont nécessaires pour initier des glissements sur des pentes très abruptes ( $>60^\circ$ ) ou très douces ( $<30^\circ$ ) par comparaison à des versants dont l'inclinaison se situe entre 30 et 60 degrés. À cet effet, il est possible que le nombre de classes considéré dans cette étude ne soit pas suffisant pour déceler un effet significatif sur les seuils. De plus, plusieurs limites pluviométriques proposées ne sont pas fiables en raison du nombre trop petit de cas analysés (Peruccacci *et al.*, 2012; Gariano *et al.*, 2015). C'est le cas de l'ensemble des seuils développés à l'échelle locale du centre urbain à partir d'enregistrements pluviométriques aux 15 minutes, mais aussi du seuil établi sur des pentes inférieures à  $10^\circ$  à l'échelle locale (données journalières) et de celui proposé à l'échelle régionale pour des versants dont l'inclinaison dépasse  $35^\circ$ . Somme toute, il demeure que l'inclinaison des pentes ne semble pas être un facteur environnemental qui affecte de manière significative les valeurs  $E-D$  minimales requises pour déclencher des glissements de terrain dans le centre urbain et la municipalité d'Angra dos Reis.



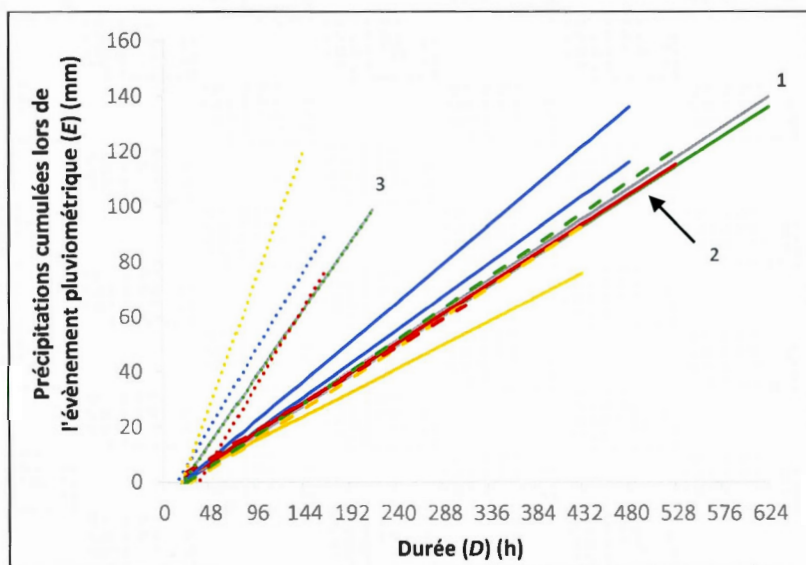
**Figure 5.8** Seuils  $ED$  minimums (5 %) établis pour divers angles de pente dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes). *Lignes* : seuils régionaux; *Tirets* : seuils locaux (données journalières); *Pointillés* : seuils locaux (données aux 15 minutes). *Rouge* :  $>35^\circ$ ; *Jaune* : 20 à  $35^\circ$ ; *Vert* : 10 à  $20^\circ$ ; *Bleu* : 0 à  $10^\circ$ ; *Gris* : seuils  $ED$  établis dans cette étude; *Numéros* : 1, municipalité d'Angra dos Reis; 2, centre urbain (données journalières); 3, centre urbain (données aux 15 minutes).



#### 5.2.4.3 Orientation des pentes

L'orientation des pentes semble avoir peu ou pas d'impact sur les valeurs *E-D* seuils lors d'évènements pluviométriques dont la durée est inférieure à quatre jours (fig. 5.9). Ceci est particulièrement surprenant pour les versants orientés au sud, soit face aux vents dominants, qui ont été affectés davantage par les glissements de terrain que toutes les autres orientations. Toutefois, il est possible que la forte humidité sur ces versants, causée entre partie par l'orientation est-ouest de la Serra do Mar et la direction des vents dominants qui soufflent vers le nord-nord-ouest, entraîne un rehaussement des valeurs seuils et un certain rééquilibrage par rapport aux seuils *ED* développés à l'échelle locale et régionale. En effet, dans la littérature scientifique on mentionne que les régions ou localités ayant une forte pluviosité requièrent davantage de pluie afin de générer des glissements par comparaison à celles possédant une faible pluviosité (Guidicini et Iwasa, 1977; Innes, 1983; Guzzetti *et al.*, 2007). Pour des durées pluviométriques supérieures à 96 heures, les tendances sont similaires à l'exception des versants orientés au nord dans le centre urbain d'Angra dos Reis, où l'écart avec le seuil *ED* local est de 10 mm pour 192 heures de précipitations et de plus de 30 mm pour 480 heures de précipitations. De la sorte, il semble que les versants nord du centre urbain d'Angra dos Reis réagissent différemment aux précipitations durant plusieurs jours, voire des semaines. Toutefois, le fait que seulement 113 cas ont servis à établir la limite pluviométrique à l'échelle locale met un doute quant à la validité de ce constat, car comme le souligne Peruccacci *et al.* (2012), au moins 175 données doivent être employées dans l'établissement d'un seuil pluviométrique afin de s'assurer d'une incertitude relativement basse (<10 %). De plus, ce constat ne peut être validé par les données recueillies à l'échelle locale à partir d'enregistrements pluviométriques aux 15 minutes étant donné qu'aucun des seuils proposés à cette échelle ne possède la quantité minimale requise pour s'assurer de l'établissement de seuils fiables (Gariano *et al.*, 2015).

En fonction des résultats obtenus, il semble donc peu probable que les valeurs pluviométriques de déclenchement des glissements de terrain dans le centre urbain et la municipalité d'Angra dos Reis varient en fonction de l'orientation des pentes et ce, même si ce paramètre influence, dans une certaine mesure, la fréquence d'occurrence du phénomène.



**Figure 5.9** Seuils *ED* minimums (5 %) établis pour diverses orientations de pente dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes). *Lignes* : seuils régionaux; *Tirets* : seuils locaux (données journalières); *Pointillés* : seuils locaux (données aux 15 minutes). *Rouge* : ouest; *Jaune* : est; *Vert* : sud; *Bleu* : nord; *Gris* : seuils *ED* établis dans cette étude; *Numéros* : 1, municipalité d'Angra dos Reis; 2, centre urbain (données journalières); 3, centre urbain (données aux 15 minutes).

#### 5.2.4.4 Occupation du sol

En dernière analyse, les seuils *ED* développés pour diverses catégories d'occupation du sol affichent une très grande similitude au niveau de la quantité de pluie requise pour déclencher des glissements de terrain lors d'événements pluviométriques dont la durée est inférieure à 144 heures et ce, à l'échelle locale et régionale (fig. 5.10). Autrement dit, le déclenchement de glissements de terrain dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis semble indépendant du type d'occupation du sol pour des événements pluviométriques durant moins de six jours. À cet égard, les limites proposées à l'échelle locale du centre urbain à partir d'enregistrements pluviométriques aux 15 minutes ne possèdent pas suffisamment de données pour être considérées fiables et représentatives des conditions de déclenchement (Peruccacci *et al.*, 2012); ce qui est également le cas des seuils *ED* développés pour les pâturages du centre urbain (données journalières) et les dunes de l'ensemble de la municipalité. Malgré un nombre restreint de seuils possédant un échantillonnage adéquat, une influence de l'occupation du sol

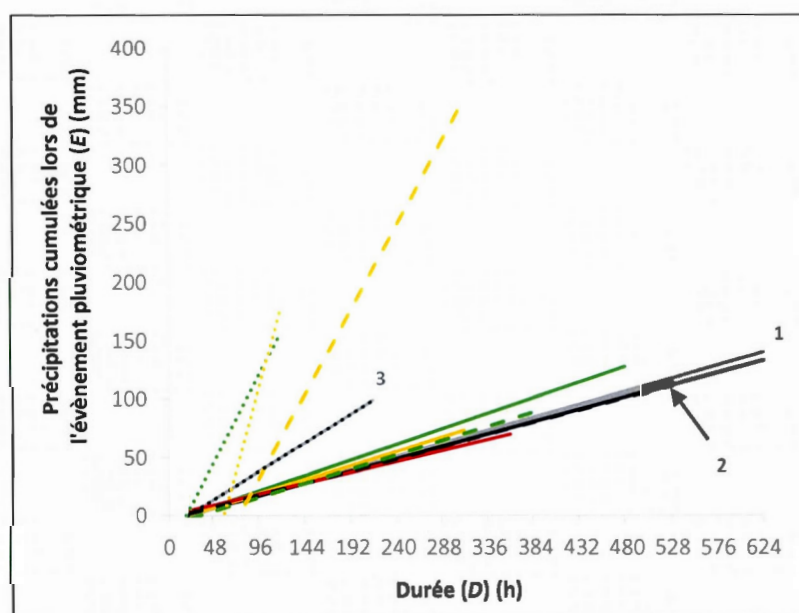
sur les limites pluviométriques est tout de même décelable à l'échelle régionale de la municipalité pour des événements pluviométriques dont la durée excède 144 heures. En effet, pour de très longues précipitations événementielles, les zones végétalisées et les pâturages possèdent une limite pluviométrique plus élevée par comparaison au seuil régional, tandis que les zones urbaines ont une limite légèrement plus faible. Concernant les zones de forêt et de pâturages, leur écart avec le seuil régional est de 7 et 3 mm respectivement pour des précipitations d'une durée de 168 heures, de 13 et 6 mm pour 312 heures de pluie et de 21 mm pour les zones végétalisées lors d'événements durant au moins 20 jours. Pour les zones urbanisées, les valeurs seuils sont 2, 5 et 7 mm plus basses que le seuil régional pour des précipitations de 168, 312 et 624 heures. Somme toute, les écarts avec le seuil *ED* proposé pour l'ensemble de la municipalité d'Angra dos Reis sont relativement faibles, à l'exception du seuil établi dans les zones de forêt pour des durées excédant 144 heures. Néanmoins, ces tendances observées à l'échelle régionale concordent avec les constats provenant de la littérature scientifique. D'une part, il a été démontré que la végétation a un effet stabilisateur sur les sols en augmentant leur résistance par le biais, entre autres, d'un système racinaire profond (ancrage), d'une capacité de drainage accrue et d'une évapotranspiration qui réduit le contenu en humidité des sols (FAO, 2013). Par conséquent, la quantité de pluie nécessaire au déclenchement des glissements de terrain est plus élevée dans les sols forestiers par comparaison aux autres types de sols considérés dans cette étude où les arbres ont été retirés pour permettre l'élevage de bétail et le développement urbain. En effet, Montgomery *et al.* (2000) ont démontré que la déforestation sur certains versants en Oregon avait augmenté la fréquence des glissements de terrain de 3 à 9 fois en raison d'un abaissement des seuils pluviométriques. C'est également le cas d'Akali *et al.* (2010) qui ont remarqué en Turquie que les sols complètement végétalisés possédaient un seuil *ID* significativement plus élevé que les sols agricoles. D'autre part, le seuil légèrement plus élevé et court associé aux zones de pâturages est probablement lié à une interaction complexe entre le bétail et les caractéristiques de sol. Il est en effet possible que le piétinement bovin ait causé un remodelage et une compaction du sol qui favorise le déclenchement de glissements de terrain sous la forme presque exclusive d'écoulements (Larsen et Torres-Sánchez, 1998). De la sorte, des précipitations plus importantes et plus courtes par comparaison aux sols urbanisés sont possiblement requises pour déclencher ces écoulements (Campbell, 1975; Wiczorek, 1987;



Au, 1998; Crosta, 1998; Corominas et Moya, 1999; Zêzere et Rodrigues, 2002; Gabet *et al.*, 2004; Martelloni *et al.*, 2012). De plus, il est probable que le seuil associé aux pâturages soit légèrement plus élevé que celui de l'ensemble de la municipalité en raison de la forte proportion de cas provenant des zones urbanisées (57,8 %), ce qui induit un déplacement vers le bas de la limite pluviométrique régionale.

En dernier lieu, le seuil légèrement plus faible associé aux zones urbanisées était attendu compte tenu de l'impact considérable engendré par la déforestation, le développement résidentiel sur les versants et l'imperméabilisation des surfaces sur la modification des conditions naturelles de stabilité (Selby, 1993; Larsen et Torres-Sánchez, 1998; Chowdhury et Flentje, 2002; Fernandes *et al.*, 2004; FAO, 2013). D'ailleurs, la comparaison des seuils pluviométriques proposés par Kanungo et Sharma (2014) et Mathew *et al.* (2013) pour des glissements survenus en bordure d'une route dans l'Himalaya, avec la limite établie par Dahal et Hasegawa (2008) pour des glissements s'étant produits en milieu naturel dans le même secteur, semble confirmer l'effet anthropique et du type d'occupation du sol sur la stabilité des pentes. En effet, les valeurs critiques obtenues par Kanungo et Sharma (2014) et Mathew *et al.* (2013) sont considérablement plus faibles (environ deux fois) que celles obtenues par Dahal et Hasegawa (2008). Au (1998) a déterminé que les sols urbanisés de l'île de Hong Kong et Kowloon, en Chine, nécessitaient 420 mm de pluie pour une saturation et le déclenchement de glissements de terrain par comparaison à 640 mm pour les zones non urbanisées. Il a aussi été observé dans plusieurs villes brésiliennes fortement urbanisées que des précipitations critiques plus faibles que la normale sont responsables du déclenchement de glissements de terrain en raison, entre autres, de l'utilisation du sol désordonnée et incontrôlée, laquelle est effectuée sans planification adéquate et adaptée à l'environnement physique et climatique (MIC, 2006; Ribeiro *et al.*, 2013). Enfin, s'il a été observé que les zones urbanisées affectaient les valeurs pluviométriques seuils à l'échelle de la municipalité, il est fort probable qu'elles aient également un impact à l'échelle du centre urbain où la densité urbaine est très élevée. À cet égard, l'étude réalisée par De Carvalho *et al.* (2012) à l'échelle du centre urbain d'Angra dos Reis a démontré à quel point le déclenchement de glissements de terrain en janvier 2010 avait été directement lié à la concentration d'injections ponctuelles d'eau dans le sol, plus spécifiquement à des fuites provenant de conduits artificiels localisés sur les versants.

Bref, le déclenchement de glissements de terrain dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis semble indépendant de l'occupation du sol pour des événements pluviométriques d'une durée inférieure à 144 heures. Au-delà de cette durée, les résultats dégagés suggèrent que l'occupation du sol influence bel et bien les valeurs pluviométriques seuils et ce, plus particulièrement à l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis. Il semble que les zones de pâturage et de forêts sont à l'origine d'un rehaussement des seuils *ED* établis à l'échelle locale et régionale, alors que les zones urbanisées, fortement représentées au niveau du nombre de glissements y ayant été déclenché, seraient responsables d'un abaissement des limites pluviométriques et plus globalement, des limites relativement faibles obtenues pour les secteurs analysés dans la municipalité d'Angra dos Reis.



**Figure 5.10** Seuils *ED* minimums (5 %) établis pour diverses occupations du sol dans la municipalité d'Angra dos Reis et le centre urbain (enregistrements journaliers et aux 15 minutes). *Lignes* : seuils régionaux; *Tirets* : seuils locaux (données journalières); *Pointillés* : seuils locaux (données aux 15 minutes). *Rouge* : dune de sable; *Jaune* : pâturage; *Vert* : forêt; *Noir* : zone urbaine; *Gris* : seuils *ED* établis dans cette étude; *Numéros* : 1, municipalité d'Angra dos Reis; 2, centre urbain (données journalières); 3, centre urbain (données aux 15 minutes).

### 5.2.5 Influence des précipitations antécédentes

Il est reconnu dans la littérature scientifique que les précipitations antécédentes peuvent être un facteur prédisposant dans le déclenchement des glissements de terrain en raison de leur influence sur les niveaux d'eau souterraine et l'humidité des sols (Wieczorek, 1987; Wieczorek et Glade, 2005). Toutefois, leur influence sur le déclenchement des glissements demeure complexe à déterminer étant donné qu'elle dépend aussi d'autres facteurs tels que l'épaisseur et la perméabilité du sol, l'inclinaison des pentes et le climat régional (Kim *et al.*, 1991; Terlien, 1998; Aleotti, 2004). Lorsque leur rôle est avéré, le nombre de jours devant être considéré demeure sujet à débat (Rahardjo *et al.*, 2001; Wieczorek et Glade, 2005; Frattini *et al.*, 2009). Dans cette étude, les faibles valeurs seuils obtenues pour le centre urbain et l'ensemble de la municipalité d'Angra dos Reis laissent présager une forte influence des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain. Cependant, une analyse plus détaillée est nécessaire afin de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

Dans un premier temps, les résultats dégagés par la mise en relation des précipitations journalières ( $R$ ) et des précipitations antécédentes cumulées sur 3, 5, 10, 15 et 30 jours ( $A_{(3j)}$ ,  $(5j)$ ,  $(10j)$ ,  $(15j)$ ,  $(30j)$ ) associées à chaque glissement révèle que ces dernières ont bel et bien une influence positive sur le déclenchement des glissements de terrain dans le centre urbain et l'ensemble de la municipalité d'Angra dos Reis. En effet, pour toutes les combinaisons considérées, une forte proportion des glissements sont concentrés dans la partie inférieure droite des graphiques, indiquant que les précipitations antécédentes au moment du déclenchement étaient plus élevées que les précipitations journalières. Une analyse plus approfondie révèle que plus de 90 % des glissements déclenchés dans le centre urbain et la municipalité d'Angra dos Reis avaient des totaux antécédents supérieurs aux totaux journaliers lorsqu'analysée sur 10, 15 et 30 jours. Certains glissements ont même été déclenchés après avoir cumulé plus de 1000 mm de pluie en seulement 30 jours. Concernant l'évaluation des précipitations antécédentes à l'échelle locale du centre urbain à partir de données pluviométriques aux 15 minutes, elle indique qu'un maximum de 82 % des glissements possédait des valeurs antécédentes supérieures aux valeurs journalières lorsque considéré sur 15 et 30 jours. Bref, ces résultats indiquent que les précipitations antécédentes ont une influence



positive sur le déclenchement de glissements de terrain et que cette influence semble particulièrement significative lorsque considérée sur 10 jours ou plus.

Dans un deuxième temps, la régression logistique binaire réalisée sur les cinq combinaisons de variables possibles, soit chacune des périodes antécédentes considérées couplées aux précipitations journalières, a permis de déterminer que 15 jours de précipitations antécédentes représentent la période la plus significative pour discriminer les événements déclencheurs et non-déclencheurs des glissements de terrain à l'échelle régionale de la municipalité d'Angra dos Reis. En ce qui concerne le centre urbain d'Angra dos Reis, les résultats varient en fonction de la résolution des données pluviométriques employées. En effet, lorsque des données journalières sont utilisées, la période antécédente la plus pertinente est de 15 jours, tandis qu'à partir d'enregistrements aux 15 minutes il s'agit d'une période de 30 jours. Toutefois, l'utilisation du critère d'information d'Akaike (AIC) révèle que la qualité du modèle avec 30 jours de pluie antécédente est presque identique à celui de 15 jours. La légère différence au niveau des résultats semble liée à l'emploi de données pluviométriques à résolution plus fine. Cependant, il est également possible qu'une période antécédente plus longue soit bel et bien requise dans le centre urbain par rapport au reste de la municipalité afin de saturer les sols et faciliter le déclenchement des glissements. Ceci pourrait être lié à des sols plus profonds dans le centre urbain, en raison d'une altération plus intense et d'un fort colluvionnement, ce qui nécessite inévitablement davantage de pluie pour initier des glissements (Terlien, 1998; Kanungo et Sharma, 2014). Selon Terlien (1998), la différence dans le nombre de jours jugé significatif s'explique en partie par la profondeur de la surface de rupture; les sols superficiels ( $<2$  m) nécessitant une période antécédente plus courte et moins de précipitations pour déclencher des glissements par comparaison aux sols profonds ( $>2$  m). De manière générale, les périodes de précipitations antécédentes jugées significatives à Angra dos Reis se conforment aux périodes de 15 et 25 jours identifiés par Terlien (1998) pour des glissements en Colombie et à celle de 15 jours proposée par Chleborad (2003) pour la ville de Seattle aux États-Unis ainsi que Pasuto et Silvano (1998) dans les Dolomites en Italie. Toutefois, seul Terlien (1998) a analysé le rôle des précipitations antécédentes dans un environnement tropical, suggérant que le régime climatique n'est pas le principal facteur permettant de déterminer le nombre de jours significatifs. De plus, les résultats obtenus dans cette recherche, qui indiquent que les précipitations antécédentes affectent le déclenchement des glissements de terrain,

contredisent le constat dégagé par Brand *et al.* (1984) à Hong Kong, à savoir que les précipitations antécédentes ne sont pas un facteur important dans les régions tropicales caractérisées par des précipitations de forte intensité qui sont suffisantes à elles seules pour déclencher des glissements. Ce constat s'explique par le fait que les auteurs ont analysé l'influence des précipitations antécédentes uniquement sur les coulées de débris; celles-ci étant généralement déclenchées dans des sols superficiels et peu perméables qui sont davantage propices au ruissellement de surface et à la mobilisation subséquente de sédiments lors d'averses courtes et très intenses (Campbell, 1975; Wieczorek, 1987; Wieczorek et Glade, 2005; Cannon *et al.*, 2008; Martelloni *et al.*, 2012; Staley *et al.*, 2012). Somme toute, il semble donc qu'un minimum de 15 jours de précipitations antécédentes soit requis pour que suffisamment d'humidité s'accumule dans le sol et permette le développement de pressions hydrauliques en excès et ce, aux deux échelles d'analyses. Il est toutefois possible qu'une période légèrement plus longue (30 jours) soit requise dans le centre urbain par rapport à l'ensemble de la municipalité en raison de sols plus altérés et profonds ayant une capacité de stockage de l'eau plus élevée et une plus faible conductivité hydraulique (Terlien, 1998; Kanungo et Sharma, 2014).

Une fois les périodes antécédentes les plus influentes identifiées, des seuils minimums ont été établis pour les variables  $R$  et  $A_{\theta}$ , soit des droites englobant 95 % des glissements déclenchés durant les périodes d'étude considérées. Les valeurs identifiées montrent qu'aussi peu qu'un millimètre de pluie journalière peut initier des glissements. Pour ce faire, il semble toutefois qu'au moins 21-22 mm de précipitations antécédentes sur 15 jours et 87 mm sur 30 jours doivent être cumulés dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis. À cet égard, le seuil quatre fois plus élevé pour des précipitations antécédentes cumulées sur 30 jours est principalement attribuable à la plus longue période antécédente considérée. De la sorte, une période significative de 5 ou 10 jours aurait probablement causé une diminution des valeurs antécédentes sous les 20 mm, alors qu'une période plus longue aurait possiblement augmenté la valeur seuil au-dessus des 100 mm. De manière générale, les limites pluviométriques associées aux précipitations journalières et antécédentes varient en fonction de paramètres environnementaux. Plus précisément, la valeur journalière minimale est fonction de la couverture végétale (évapotranspiration, interception) et de l'inclinaison des pentes, tandis que la valeur antécédente minimale dépend essentiellement de l'épaisseur du sol et de sa porosité

(perméabilité) (Gabet *et al.*, 2004). De la sorte, les faibles valeurs journalières associées aux échelles d'étude permettent de croire que la majorité des glissements de terrain ont été déclenchés sur des pentes fortement inclinées où la couverture végétale est peu dense (faible évapotranspiration et interception de la pluie). En contrepartie, les faibles valeurs antécédentes laissent présager des sols particulièrement minces ayant une faible capacité de stockage de l'eau, lequel favorisent le déclenchement de glissements lors de périodes ayant cumulé très peu d'eau. Les deux paramètres sont donc intimement liés étant donné que les pentes fortement inclinées sont généralement défavorables à l'établissement d'une végétation dense ainsi qu'au développement en profondeur des sols, ce qui réduit la stabilité relative des sols et favorise leur saturation lors des averses moins importantes. Bref, les valeurs seuils établis pour les variables  $R$  et  $A_{(t)}$  indiquent que plusieurs glissements ont été déclenchés dans des sols relativement minces, fortement inclinés et exempts de végétation. Néanmoins, les fortes valeurs associées à certains glissements montrent à quel point ces paramètres environnementaux peuvent varier à l'échelle du territoire et influencer différemment les conditions pluviométriques de déclenchement.

En ce qui a trait à la capacité prédictive des modèles identifiés comme les plus significatifs, ce sont ceux développés pour le centre urbain qui possèdent les pourcentages de prédiction correcte les plus élevées, avec 76,7 % pour le modèle établi à partir de données pluviométriques aux 15 minutes et 66,8 % pour celui employant des données journalières. Malgré tout, le modèle développé à partir de données pluviométriques à résolution plus fine n'a pas la meilleure capacité prédictive, lorsque comparée aux autres groupes de paramètres analysés. En effet, tous les modèles à l'exception de celui utilisant trois jours de précipitations antécédentes ont une capacité prédictive supérieure à 77 %. Ceci découle de l'utilisation du critère d'information d'Akaike (AIC) qui estime la qualité relative de chaque modèle par rapport aux autres et détermine que le meilleur modèle est celui associé à la plus petite perte d'information, et non au meilleur potentiel prédictif (Akaike, 1980). À cet égard, le modèle combinant 30 jours de précipitations antécédentes aux précipitations journalières demeure néanmoins très similaire à celui utilisant 10 jours de précipitations antécédentes et qui représente le meilleur modèle en termes de pourcentage de prédictions correctes avec seulement quatre fausses alertes et trois alertes manquées de plus. À l'échelle régionale de la municipalité, la fiabilité du modèle se chiffre à 61,7 %, ce qui est légèrement inférieur aux



autres modèles développés dans le centre urbain. Cette situation s'explique dans l'imposante base de données employée à cette échelle qui comprend 2590 événements déclencheurs et non-déclencheurs par comparaison à 631 et 198 cas à l'échelle locale pour des données journalières et aux 15 minutes. Néanmoins, une tendance générale apparaît dans tous les modèles, soit une capacité prédictive accrue pour les événements non-déclencheurs (77 à 88 %) par comparaison aux événements déclencheurs (53 à 67 %). Ceci se traduit par un nombre relativement élevé de fausses alertes (*faux positifs*), soit la prédiction de glissements de terrain qui ne se produisent pas, ce qui inévitablement restreint l'utilisation des modèles et leur intégration dans des systèmes de surveillance et d'alerte (Berti *et al.*, 2012; Peruccacci *et al.*, 2012). Le nombre élevé de fausses alertes, particulièrement pour le modèle associé à la municipalité d'Angra dos Reis, est vraisemblablement dû à la taille de l'échelle d'analyse. En effet, plus la superficie analysée est grande, plus le nombre de fausses alertes est élevé (Guzzetti *et al.*, 2007). Somme toute, les modèles développés ont des capacités prédictives relativement bonnes, particulièrement lorsque des données pluviométriques aux 15 minutes sont employées. La validation des modèles à partir de jeux de données plus récents permettrait de confirmer ou d'infirmer leur potentiel d'intégration au sein de systèmes d'alerte.

De manière plus spécifique aux « meilleurs » modèles sélectionnés, les valeurs  $p$  inférieures à 0,05 et associées à chacune des variables analysées indiquent qu'elles sont toutes significatives, soit qu'un changement de valeur de ces variables prédictives affecte inévitablement la variable de réponse (occurrence ou non-occurrence de glissements). Les valeurs exponentielles des variables prédictives dégagées pour les différents modèles probabilistes montrent quant à elles que toutes les variables considérées affectent positivement la probabilité d'occurrence de glissement de terrain à l'échelle du centre urbain et de la municipalité d'Angra dos Reis. Les précipitations journalières affectent toutefois davantage les probabilités d'occurrence que les précipitations antécédentes cumulées 15 ou 30 jours et ce, à toutes les échelles d'analyse. En effet, l'ajout d'un millimètre de précipitations journalières cause une augmentation des probabilités de déclenchement de 0,6 à 3,74 % en fonction de l'échelle d'analyse, tandis que l'ajout d'un millimètre de précipitations antécédentes ne fait qu'accroître les probabilités de 0,25 à 0,83 %. À cet égard, l'impact des précipitations journalières est particulièrement élevé dans le centre urbain d'Angra dos Reis (données journalières). Autrement dit, pour chaque millimètre de précipitation journalière supplémentaire, la capacité du modèle à discriminer

entre un évènement déclencheur et non-déclencheur s'améliore de manière significative par comparaison au modèle associé à l'ensemble de la municipalité. La dispersion réduite dans l'espace graphique  $R-A_{(t)}$  des évènements n'ayant pas déclenché de glissement de terrain facilite ainsi la discrimination des épisodes, un aspect inévitablement lié à la taille des échantillons utilisés.

Enfin, les tendances analysées précédemment se répercutent directement sur les probabilités graphiques dégagées à partir des fonctions logistiques obtenues par l'intégration des coefficients de régression associés aux variables prédictives  $R$  et  $A_{(t)}$ . Si la capacité prédictive augmente graduellement à l'échelle du centre urbain (données aux 15 minutes) et de la municipalité en fonction d'un accroissement des précipitations journalières et des précipitations antécédentes, elle s'accroît particulièrement vite à l'échelle du centre urbain (données journalières). Ainsi, il est possible de prédire l'occurrence de glissements de terrain à l'échelle du centre urbain (données journalières) avec une incertitude inférieure à 5 % lors de précipitations journalières délaissant aussi peu que 1 mm ou 40 mm et ce, si au moins 21,5 et 329 mm de précipitations antécédentes sur 15 jours ont respectivement été cumulées. À titre comparatif, mais à partir de données pluviométriques aux 15 minutes, ce sont plus de 180 mm de précipitations journalières pour 87 mm de précipitations antécédentes sur 30 jours et plus d'un millimètre pour 876 mm antécédents qui sont requis pour obtenir une capacité prédictive supérieure à 95 % à l'échelle locale. À l'échelle régionale, les valeurs sont également très élevées avec plus de 268 mm de précipitations journalières pour 22,1 mm de pluie antécédente sur 15 jours et plus d'un millimètre pour 659 mm antécédents qui sont nécessaires pour discriminer avec une précision supérieure à 95 % les évènements déclencheurs et non-déclencheurs. De la sorte, plus de 267 mm de pluie en 31 jours à l'échelle locale (données aux 15 minutes) et 290,1 mm en 16 jours à l'échelle régionale sont minimalement requis pour permettre des prédictions quasi certaines, par comparaison à seulement 61,5 mm en 16 jours à l'échelle du centre urbain (données journalières). Cette valeur de 290,1 mm en 16 jours associée à l'ensemble de la municipalité d'Angra dos Reis, par comparaison à la valeur de 84,6 mm en 384 heures de précipitations événementielles proposé à la même échelle, s'approche davantage de la valeur de 257 mm en 384 heures (16 jours) associée au seuil proposé par Kanji *et al.* (2003) pour la Serra do Mar. Ceci semble valider l'idée que le seuil proposé par ces auteurs correspond davantage à un seuil maximum qu'un seuil minimum et ce,

en raison de l'utilisation d'une base de données comportant essentiellement des glissements de terrain majeurs. De la sorte, l'établissement dans cette étude de seuils *ED* et antécédents maximums aurait permis une meilleure comparaison avec les seuils établis au Brésil et dans le monde en général. Toutefois, les seuils minimaux proposés demeurent pertinents au sens où ils donnent un bon aperçu des très faibles valeurs requises pour initier des glissements dans cette partie du Brésil, une composante essentielle à la gestion de risque. L'analyse de l'influence des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain dans la municipalité d'Angra dos Reis semble expliquer, dans une certaine mesure, les faibles valeurs seuils obtenues. Ainsi, il n'est pas étonnant que plusieurs glissements aient été déclenchés par de très faibles valeurs journalières et événementielles compte tenu de la quantité élevée d'humidité pouvant s'accumuler durant les 15 ou 30 jours précédents.

### 5.3 Limites de la recherche

Une évaluation précise et représentative des réelles conditions pluviométriques associées au déclenchement de glissements de terrain dans la municipalité et le centre urbain d'Angra dos Reis n'est pas facile à réaliser. En effet, l'établissement de seuils pluviométriques requiert des données précises sur l'occurrence des glissements, des données pluviométriques représentatives de la quantité de pluie tombée à l'échelle du territoire et une méthodologie adaptée aux types de données recueillies et aux objectifs fixés. Dans le cadre de cette recherche, plusieurs limites sont associées à ces trois paramètres et font en sorte de réduire la portée et la signification des résultats obtenus.

Tout d'abord, les données pluviométriques proviennent de pluviomètres localisés à moins de 220 mètres d'altitudes (tabl. 3.1), ce qui peut engendrer une sous-estimation des valeurs réelles responsables du déclenchement des glissements de terrain et ce, en raison de l'effet orographique causé par la Serra do Mar qui engendre plus de précipitations en altitude et sur les versants exposés aux vents dominants. Ensuite, compte tenu des superficies élevées associées aux régions pluviométriques, qui sont toutes supérieures à 50 km<sup>2</sup> (atteignant même une aire de 236 km<sup>2</sup> à Jacuecanga), la fiabilité des données pluviométriques est inévitablement réduite. Reichenbach *et al.* (1998) affirment que les données pluviométriques devraient provenir d'un réseau de stations pluviométriques suffisamment dense qui comprend au moins



un pluviomètre par 50 km<sup>2</sup>. Dans un tel cas, cela aurait réduit l'aire d'influence des régions pluviométriques et augmenté la fiabilité des valeurs pluviométriques. L'utilisation de données journalières réduit aussi la précision et représentativité des seuils établis, particulièrement à l'échelle locale du centre urbain. En effet, les enregistrements journaliers ne permettent pas de cerner le pic d'intensité, une mesure fondamentale dans les régions où les précipitations convectives de courte durée et de forte intensité déclenchent régulièrement des glissements de terrain (Aleotti, 2004; Berti *et al.*, 2012). De plus, elles sont inadéquates pour définir des seuils pluviométriques précis et spécifiques à un site (Reichenbach *et al.*, 1998). Enfin, une grande incertitude est associée aux données pluviométriques étant donné que la majorité des mesures doivent être relevées manuellement et ce, par des volontaires ne possédant aucune formation adéquate. À cet égard, l'implantation de dix nouveaux pluviomètres semi-automatiques à la fin de l'année 2013 dans la municipalité d'Angra dos Reis devrait permettre l'obtention de données plus précises et fiables (O Fluminense, 2013).

Quant au registre des glissements de terrain, la précision temporelle des cas rapportés aux autorités municipales d'Angra dos Reis est difficile à déterminer. Il est ainsi possible que la date associée aux cas rapportés soit décalée d'une ou deux journées par rapport à la date réelle de déclenchement. Si les dates associées aux glissements sont erronées (ex. le cas est répertorié deux jours plus tard que la réelle date de déclenchement), il est fort probable que les valeurs pluviométriques liées aux différents cas soient également inexactes. Par conséquent, les seuils pluviométriques développés auront une fiabilité réduite, les valeurs seuils ayant été sous-estimées ou surestimées. De plus, le registre utilisé ne contient probablement pas tous les cas survenus dans la municipalité. Les glissements qui surviennent dans des milieux inhabités ne sont généralement pas rapportés du fait qu'ils n'affectent pas la population ou qu'ils ne sont tout simplement pas recensés (Tiranti et Rabuffetti, 2010). Des informations sur la morphométrie des glissements, le type de mouvement et/ou le volume déplacé auraient également permis l'établissement de seuils plus précis en fonction de la typologie des glissements.

À propos des seuils établis dans cette étude, les limites sont essentiellement liées à un manque de données qui réduit leur fiabilité et leur représentativité. Plusieurs seuils permettant d'évaluer l'influence des paramètres environnementaux sur les limites pluviométriques régionales et

locales ne contiennent pas le minimum de 75 échantillons proposé par Peruccacci *et al.* (2012). Plusieurs n'ont également pas le minimum de 175 données telles que suggéré par ces mêmes auteurs afin d'assurer une incertitude relativement basse ( $<10\%$ ). Une dernière limite associée aux seuils proposés concerne leur représentativité à long terme étant donné que les systèmes naturels sont généralement affectés par des changements radicaux au niveau du régime pluvial et de la couverture et de l'utilisation du sol (Berti *et al.*, 2012). De la sorte, les conditions ayant favorisé le déclenchement des glissements de terrain dans le passé ne sont peut-être plus représentatives des conditions actuelles et futures.

D'autres études sont donc nécessaires dans la région d'Angra dos Reis afin de confirmer ou infirmer les tendances dégagées dans la présente recherche, plus particulièrement en ce qui a trait aux faibles valeurs  $E-D$  obtenues, au rôle des précipitations antécédentes et à l'influence exercée par les différentes variables environnementales (lithologie, occupation du sol, inclinaison et orientation des pentes). L'utilisation de séries pluviométriques plus longues et à haute résolution ainsi que l'emploi d'un registre de glissements de terrain plus détaillé permettrait l'établissement de seuils pluviométriques plus fiables et représentatifs des conditions réelles de déclenchement.

## CONCLUSION

Dans l'environnement montagneux et tropical de la municipalité d'Angra dos Reis au Brésil, la fréquence élevée des averses intenses génère de nombreux glissements de terrain qui interfèrent de manière récurrente avec les activités humaines et les infrastructures. Dans un contexte de changements climatiques et d'urbanisation croissante associée à un développement dans des zones susceptibles aux mouvements de sol et à une utilisation du territoire désordonnée et incontrôlée, effectuée sans planification adéquate et adaptée à l'environnement physique et climatique de la région, une intensification de l'aléa naturel est à prévoir (FBDS, 2009; IPCC, 2012; Ribeiro *et al.*, 2013). L'étude des relations entre les caractéristiques pluviométriques et l'occurrence des glissements de terrain prend ici toute son importance afin d'améliorer la prévision spatiale et temporelle du phénomène et en minimiser les répercussions à des fins d'aménagement sécuritaire du territoire. L'établissement de seuils pluviométriques quantitatifs qui, lorsqu'atteints ou excédés, sont susceptibles de déclencher des glissements apparaît donc une approche valable de gestion du risque. Toutefois, les relations entre les caractéristiques pluviométriques et l'occurrence des glissements de terrain dans le Sud-est brésilien soulèvent encore peu l'intérêt des chercheurs. En effet, il n'existe toujours pas de seuils fiables et représentatifs de l'activité géomorphologique sur le territoire d'Angra dos Reis qui pourraient fournir un outil de gestion pertinent aux autorités municipales.

La dynamique spatio-temporelle des glissements de terrain est particulièrement complexe compte tenu des variations intra et inter-annuelle du régime pluviométrique et de l'hétérogénéité des caractéristiques environnementales, lesquelles influent sur la stabilité des sols. Dans la municipalité d'Angra dos Reis, une forte proportion de sols demeure en état de stabilité précaire étant donné que des glissements de terrain peuvent survenir à tout moment de l'année et ce, malgré des périodes de précipitations moins importantes. Les mois et les années à forte pluviosité sont inévitablement caractérisés par une activité géomorphologique intense. La fréquence des glissements est donc dépendante du régime pluviométrique à l'échelle du territoire. Par contre, une dynamique légèrement différente dans la partie méridionale de la municipalité et dans le centre urbain laisse présager une influence des caractéristiques



environnementales variables à l'échelle du territoire. La lithologie, l'orientation des versants et l'occupation du sol sont des paramètres biophysiques qui semblent particulièrement influencer la dynamique spatiale des glissements, alors que l'inclinaison des pentes apparaît négligeable. Les zones urbaines, les versants orientés au sud et les secteurs constitués d'orthogneiss et de dépôts alluviaux et fluvio-marins semblent très propices au déclenchement de glissements de terrain, quoique plusieurs autres facteurs environnementaux non investigués dans cette étude pourraient potentiellement interagir sur la stabilité des sols. Une étude plus approfondie incluant toutes les composantes pouvant prédisposer les sols à des glissements est donc nécessaire afin de mettre sur pied des stratégies de gestion adéquates visant à prévoir de manière précise le moment et l'endroit d'occurrence de cet aléa.

L'établissement de seuils basés sur la durée des événements pluviométriques ( $ED$  et  $E_{MAPD}$ ) représente un axe de recherche dont le développement est primordial en gestion du risque, notamment afin de mettre en place un système de surveillance et d'alerte des glissements de terrain. L'étude détaillée des conditions pluviométriques ayant mené au déclenchement de 1640 glissements dans la municipalité d'Angra dos Reis et 526 glissements à l'échelle du centre urbain a révélé que de très petites quantités d'eau cumulées sur des périodes pouvant atteindre 26 jours sont suffisantes. Ces précipitations représentent 1 à 4 % de la moyenne annuelle pluviométrique selon la durée des événements considérés. Les limites pluviométriques sont particulièrement faibles lorsque comparées à la majorité des seuils proposés dans la littérature pour le Brésil, les régions tropicales et d'autres endroits à travers le monde. L'emploi d'une base de données trop générale et sans discrimination quant à la typologie et la taille des glissements est en partie responsable. Une analyse plus approfondie des seuils établis a néanmoins permis de démontrer que les conditions de déclenchement peuvent varier localement à l'échelle du territoire de la municipalité en fonction, entre autres, du régime pluviométrique et des paramètres environnementaux. Les zones constituées de paragneiss ont des seuils légèrement plus faibles par comparaison aux zones urbaines qui, en revanche, ont des limites pluviométriques inférieures aux zones fortement végétalisées; d'où l'importance d'étudier les limites pluviométriques de déclenchement en fonction d'une certaine homogénéité au niveau des conditions géologiques, géomorphologiques, climatiques et anthropiques. Les valeurs proposées sont toutefois très sensibles à la méthodologie employée, notamment quant à la résolution des enregistrements pluviométriques, la définition d'un

épisode pluviométrique et la taille des échantillons utilisés. L'implantation d'un nouveau réseau de stations pluviométriques à enregistrements horaires au mois de juin 2013 devrait permettre une identification plus précise des conditions pluviométriques responsables du déclenchement des glissements à l'échelle de la municipalité et, par conséquent, fournir un outil plus précis et adéquat aux gestionnaires (O Fluminense, 2013).

L'analyse par régression logistique a permis l'évaluation probabiliste des conditions de déclenchement et une quantification de l'incertitude associée aux seuils établis par l'intégration des événements n'ayant pas déclenché de glissements de terrain entre le 1<sup>er</sup> janvier 2008 et le 31 mars 2013. L'intégration de 950 événements non-déclencheurs à l'échelle régionale et 105 à l'échelle du centre urbain a fourni des informations pertinentes sur le rôle des variables prédictives dans l'initiation des glissements. Les précipitations cumulées ( $E$ ) et la durée des épisodes pluviométriques ( $D$ ) ont un impact positif sur le déclenchement des glissements de terrain. Cependant, les précipitations cumulées ont un impact plus significatif sur les probabilités de déclenchement que la durée des événements, spécialement dans le centre urbain d'Angra dos Reis. Ceci se traduit par une incertitude beaucoup plus faible à l'échelle locale par comparaison à l'échelle régionale lorsque des prédictions sont effectuées et ce, particulièrement lors de précipitations importantes. La capacité prédictive des modèles développés est relativement bonne. Toutefois, le nombre élevé de fausses alertes et d'alertes manquées associées aux modèles restreint leur intégration dans des systèmes de surveillance et d'alerte. Dans un avenir rapproché, le raffinement des modèles à partir de nouvelles données disponibles devrait permettre de réduire le nombre de fausses prédictions et, par conséquent, fournir un outil de gestion plus adaptée à la prévision spatiale et temporelle des glissements de terrain.

À Angra dos Reis, les précipitations antécédentes semblent être un paramètre pluviométrique influant sur le déclenchement des glissements de terrain; d'où les très faibles valeurs seuils obtenues à l'échelle locale et régionale de la municipalité. Il ressort qu'un minimum de 15 jours de précipitations antécédentes est requis pour que suffisamment d'humidité s'accumule dans le sol et permette le déclenchement de glissements. Il est toutefois possible qu'une période légèrement plus longue soit requise dans le centre urbain compte tenu de la présence de sols

particulièrement altérés et profonds. D'un point de vue probabiliste, les modèles obtenus sont bons, mais le nombre élevé de fausses prédictions limite leur capacité prédictive

En l'absence d'informations fiables et représentatives des conditions pluviométriques de déclenchement des glissements de terrain à l'échelle de la municipalité et du centre urbain d'Angra dos Reis, cette étude propose différents seuils pluviométriques permettant de cerner les caractéristiques pluviométriques responsables de l'occurrence des glissements, tout en portant une attention particulière à la variabilité spatiale des conditions géologiques, géomorphologiques, climatiques et anthropiques susceptibles d'influer sur les valeurs seuils. D'après les informations recueillies, cette recherche constitue la première application de seuils basés sur les précipitations cumulées des événements pluviométriques et sur les conditions pluviométriques antécédentes dans cette région du Brésil. D'autres études du même genre, mais avec des mesures pluviométriques à haute résolution, différentes périodes antécédentes et considérant d'autres paramètres environnementaux sont fortement souhaitables afin de parfaire les connaissances dans ce domaine et permettre l'implantation d'un système de surveillance et d'alertes efficaces basé sur des seuils pluviométriques locaux qui minimisent les mauvaises prédictions. La mise en relation des données pluviométriques avec l'occurrence (et la non-occurrence) des glissements de terrain demeure malgré tout une approche valable et pertinente pour les gestionnaires du territoire attirés à la mitigation des risques dans la mesure où elle fournit un outil permettant de quantifier les incertitudes liées aux probabilités de déclenchement.



## RÉFÉRENCES

- Addinsoft. 2014. XLSTAT: *Logiciel d'analyse de données et de statistiques pour Microsoft Excel*, version 2014.5.02 (PC, Windows 8, 150 Mb). Logiciel en ligne. (<http://www.xlstat.com/fr/>). Consulté le 2 septembre 2013.
- Akaike, H. 1980. «Likelihood and the Bayes procedure». *Trabajos de Estadística Y de Investigación Operativa*, vol. 31, no. 1, p. 143-166.
- Akcali, E., H. Arman, S. Firat, L. Saltabas et Z. Gunduz. 2010. «Rainfall thresholds for the initiation of landslides in the Tabzon Province of Turkey». *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 2, no. 4, p. 14-26.
- Aleotti, P. 2004. «A warning system for rainfall-induced shallow failure». *Engineering Geology*, vol. 73, no. 3-4, p. 247-265.
- Almeida, M. C. J., A. Nazakawa et C. Tatizana. 1993. *Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos no Município de Petrópolis, RJ* [Analyse de corrélation entre les pluies et les glissements dans la Municipalité de Petrópolis, RJ]. In *7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia* (Poços de Caldas, 12-16 septembre 1993), p. 129-133. São Paulo : ABGE.
- Angra dos Reis, préfecture municipale. 1993. *Loi sur la division du territoire de la municipalité d'Angra dos Reis*. Loi no. 270/L.O. Angra dos Reis : Publications du conseil municipal.
- Annunziati, A., A. Focardi, P. Focardi, S. Martello et P. Vannocci. 2000. «Analysis of the rainfall thresholds that induced debris flows in the area of Apuan Alps -Tuscany, Italy (19 June 1996 storm)». In *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Plinius Conference on Mediterranean Storms* (Maratea, 14-16 octobre 1999), sous la dir. de P. Claps et G. F. Wiecezorek, p. 485-493. Cosenza: European Geophysical Union and Editoriale Bios.
- Au, S. W. C. 1998. «Rain-induced slope instability in Hong Kong». *Engineering Geology*, vol. 51, no. 1, p. 1-36.
- Bacchini, M., et A. Zannoni. 2003. «Relations between rainfall and triggering of debris-flow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy)». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 3, no. 1-2, p. 71-79.
- Baum, R. L., J. W. Godt et W. Z. Savage. 2010. «TRIGRS – a FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based slope stability analysis, version 2.0». *U.S. Geological Survey*, open-file report 2008-1159, 75p.
- Bell, F. G., et R.R. Maud. 2000. «Landslides associated with the colluvial soils overlying the Natal Group in the greater Durban region of Natal, South Africa». *Environmental Geology*, vol. 39, no. 9, p. 1029-1028.

- Berti, M., M. L. V. Martina, S. Franceschini, S. Pignone, A. Simoni et M. Pizziolo. 2012. «Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach». *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, F4, 20 p.
- Bortoloti, M. 2010. *Trágico, absurdo, previsível* [Tragique, absurde, prévisible]. *VEJA*, 13 janvier, [En ligne]. (<http://veja.abril.com.br/130110/tragico-absurdo-previsivel-p-054.shtml>). Consulté le 22 mars 2004.
- Brand, E. W., J. Premchitt et H. B. Phillipson. 1984. «Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong». In *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Landslides* (Toronto, 16-21 septembre 1984), sous la dir. de Canadian Geotechnical Society, p. 377-384. Toronto: A.A. Balkema.
- Brésil, Eletrobras, Eletronuclear. 2005. *Estudo de Impacto Ambiental – EIA da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto* [Étude d'impact environnemental – EIA de l'Unité 3 de la Central Nucléaire Almirante Álvaro Alberto]. Document de consultation. [En ligne]. Angra dos Reis, volume 2, 634 p. ([http://www.eletronuclear.gov.br/hotsites/eia/v02\\_06\\_diagnostico.html](http://www.eletronuclear.gov.br/hotsites/eia/v02_06_diagnostico.html)). Consulté le 12 octobre 2013.
- Brésil, ministère des Mines et de l'Énergie, Service Géologique du Brésil [CPRM]. 2007a. *Geologia da folha Angra dos Reis SF.23-Z-C-II* [Géologie de la feuille Angra dos Reis SF.23-Z-C-II]. Contracto CPRM-UERJ no. 057/PR/05. Brasília : Programa de Geologia do Brasil, p. 181.
- Brésil, ministère des Mines et de l'Énergie, Service Géologique du Brésil [CPRM]. 2007b. *Geologia da folha Volta Redonda SF.23-Z-A-V* [Géologie de la feuille Volta Redonda SF.23-Z-A-V]. Contracto CPRM-UERJ no. 057/PR/05. Brasília : Programa de Geologia do Brasil, p. 148.
- Brésil, ministère des villes [MIC]. 2006. *Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas : Guia para elaboração de políticas municipais* [Prévention des risques de glissements de terrain en zone de versants : Guide pour l'élaboration de politiques municipales]. Brasília : Cities Alliance, 111 p.
- Brésil, ministère des Mines et de l'Énergie, Service Géologique du Brésil [CPRM]. 2014. *Riscos Geológicos* [Risques géologiques], [En ligne]. (<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=38>). Consulté le 22 mars 2014.
- Brunetti, M. T., S. Peruccacci, M. Rossi, S. Luciani, D. Valigi et F. Guzzetti. 2010. «Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, no. 3, p. 447-458.

- Brunetti, M. T., F. Luino, C. Vennari, S. Peruccacci, M. Biddoccu, D. Valigi, S. Luciani, C. G. Cirio, M. Rossi, G. Nigrelli, F. Ardizzone, M. Di Palma et F. Guzzetti. 2013. «Rainfall thresholds for possible occurrence of shallow landslides and debris flows in Italy». In *Dating torrential processes on fans and cones*, sous la dir. De M. Stoffel, M. Bollschweiler et B. Luckman, p. 327-339. Springer Science+Business Media Dordrecht.
- Caine, N. 1980. «The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows». *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, vol. 62, no. 1, p. 23-27.
- Campbell, R. H. 1975. «Soils slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica mountains vicinity, southern California». *U.S. Geological Survey Professional Paper 851*, 51 p.
- Cannon, S. H. 1988. «Regional rainfall-threshold conditions for abundant debris-flow activity». In *Landslides, floods and marine effects of the storm of January 3-5, 1982*, sous la dir. de S.D. Ellen et G.F. Wieczorek, p. 35-42. U.S. Denver: Geological Survey Professional Paper 1434.
- Cannon, S. H., et S. D. Ellen. 1985. «Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay Region, California». *California Geology*, vol. 38, no. 12, p. 267-272.
- Cannon, S. H., et J. E. Gartner. 2005. «Wildfire-related debris flow from a hazards perspective». In *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, sous la dir. de M. Jakob et O. Hungr, p. 325-362. Chichester: Praxis.
- Cannon, S. H., J. E. Gartner, R. C. Wilson, J. C. Bowers et J. L. Laber. 2008. «Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in southwestern Colorado and southern California». *Geomorphology*, vol. 96, no. 3-4, p. 250-269.
- Cannon, S. H., E. M. Boldt, J. L. Laber, J. W. Kean et D. M. Staley. 2011. «Rainfall intensity-duration thresholds for post-fire debris-flow emergency-response planning». *Natural Hazards*, vol. 59, no. 1, p. 209-236.
- Cardinali, M., M. Galli, F. Guzzetti, F. Ardizzone, P. Reichenbach et P. Bartoccini. 2006. «Rainfall induced landslides in December 2004 in south-western Umbria, central Italy: types, extent, damage and risk assessment». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 6, no. 2, p. 237-260.
- Castro, J. M. G. (2006). *Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto* [Pluviosité et mouvements de masse sur les versants de l'Ouro Preto]. Mémoire de maîtrise, Ouro Preto, *Universidade Federal de Ouro Preto*, 138 p.
- Cepeda, J., K. Höeg et F. Nadim, F. 2010. «Landslide-triggering rainfall thresholds: a conceptual framework». *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 43, no. 1, p. 69-84.
- Chen, C., T. Chen, F. YU, W. YU et C. Tseng. 2005. «Rainfall duration and debris-flow initiated studies for real-time monitoring». *Environmental Geology*, vol. 47, no. 5, p. 715-724.



- Chleborad, A. F. 2003. «Preliminary evaluation of a precipitation threshold for anticipating occurrence of landslides in the Seattle, Washington, Area». *U.S. Geological Survey*, open-file report 03-463, 14 p.
- Chowdhury, R., et P. Flentje. 2002. «Uncertainties in rainfall-induced landslide hazard». *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 35, no. 1, p. 61-70.
- Clarizia, M., G. Gúlla et G. Sorbino. 1996. *Sui meccanismi di innesco dei soil slip* [Les mécanismes de déclenchement des glissements de terrain]. In *International Conference on the Prevention of Hydrogeological Hazards: The Role of Scientific Research* (Alba, 5-7 novembre 1996), sous la dir. de F. Luino, vol. 1, p. 585-597. Alba : L'Artistica Savigliano publications.
- COPPETEC (*Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos* [Coordénation de Projets, Recherches et Études Technologiques]). 2011. *Mapeamento de Áreas de Riscos, Frente aos Deslizamentos de Encostas no Município de Angra dos Reis* [Cartographie des zones de risques, face aux glissements de terrains sur les versants de la municipalité d'Angra dos Reis]. COPPE/UFRJ, rapports 2, 3 et 4.
- Corominas, J., et J. Moya. 1999. «Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain». *Geomorphology*, vol. 30, no. 1-2, p. 79-93.
- CPRM. 2007a. Voir Brésil, ministère des Mines et de l'Énergie, Service Géologique du Brésil [CPRM]. 2007a.
- , 2007b. Voir Brésil, ministère des Mines et de l'Énergie, Service Géologique du Brésil [CPRM]. 2007b.
- , 2014. Voir Brésil, ministère des Mines et de l'Énergie, Service Géologique du Brésil [CPRM]. 2014.
- Cramer, J. S. 1999. «Predictive performance of the binary logit model in unbalanced samples». *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 48, no. 1, p. 85-94.
- Crosta, G. B. 1990. «A study of slope movements caused by heavy rainfall in Valtellina (Italy – July 1987). In *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference and Field Workshop on Landslides ALPS 90* (Milan, 12 septembre 1990), sous la dir. de A. Cancelli, p. 247-528. Milan : Ricerca Scientifica ed Educazione Permanente.
- , 1998. «Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation». *Environmental Geology*, vol. 35, no. 2-3, p. 131-145.
- Crosta, G. B. et P. Frattini. 2001. «Rainfall threshold for triggering soils slips and debris flows». In *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Plinius Conference on Mediterranean Storms* (Siena, 16-18 octobre 2001), sous la dir. de A. Mugnai, F. Guzzetti et G. Roth, p. 463-187. Siena: Bios.

- Crosta, G. B., et P. Frattini. 2003. «Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 3, no. 1-2, p. 81-93.
- , 2008. «Rainfall-induced landslides and debris flows». *Hydrological Processes*, vol. 22, no. 4, p. 473-477.
- Crozier, M J. 1999. «Prediction of rainfall-triggered landslides: A test of the Antecedent Water Status Model». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 24, no. 9, p. 825-833.
- Crozier, M. J., et T. Glade. 1999. «Frequency and magnitude of landsliding: fundamental research issues». *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplement volumes Band 115, p. 141-151.
- Cruz, O. 1974. *A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatuba : contribuição a geomorfologia tropical litorânea* [La Serra do Mar e le littoral dans la zone de Caraguatuba : contribution à la géomorphologie littorale et tropicale]. Mémoire de maîtrise, São Paulo, Universidade de São Paulo, 181 p.
- Dahal, R. K., et S. Hasegawa. 2008. «Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya». *Geomorphology*, vol. 100, p. 429-443.
- Da Silva, D. W., et M. C. Filho. 2009. *A relação entre o excessivo pisoteio de rebanhos bovinos e processos erosivos : um estudo de caso da encosta La Cabaña no município de Guarapuava – PR* [La relation entre le piétinement excessif des troupeaux bovins et les processus érosifs : une étude de cas du versant La Cabaña dans la municipalité de Guarapuava – PR]. In *Semana de integração Ensino, Pesquisa e Extensão* [Semaine d'intégration à l'enseignement, la recherche et la vulgarisation] (Guarapuava, 26 au 30 octobre 2009), 4 p. Guarapuava : Anais da SIEPE.
- De Almeida, F. D. M., et C. D. R. Carneiro. 1998. *Origem e evolução da Serra do Mar* [Origine et évolution de la Serra do Mar]. *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 28, no. 2, p. 135-150.
- De Carvalho, N. L., A. C. F. Campello, I. D. S. Araújo, A. M. Sato et A. L. C. Netto. 2012. *Levantamento da rede de drenagem artificial como elemento para elaboração de um mapa de risco. Município de Angra dos Reis, Rio de Janeiro* [Enquête sur le réseau de drainage artificiel en tant qu'élément nécessaire à l'élaboration d'une carte de risque. Municipalité d'Angra dos Reis, Rio de Janeiro]. *Revista GEONORTE*, édition spéciale, vol. 1, no. 4, p. 772-781.
- De Castro, V. M. 2012. *Estudo sobre a estabilidade da encosta do Morro da Sapinhatuba I, Angra dos Reis, RJ* [Étude sur la stabilité du versant du Morro da Sapinhatuba I, Angra dos Reis, RJ]. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, monographie de graduation, 76 p.
- De Ploey, J. et O. Cruz. 1979. «Landslides in the Serra do Mar, Brazil». *Catena*, vol. 6, no. 2, p. 111-122.

- De Souza, F. T., et N. F. F. Ebecken. 2012. «A data based model to predict landslide induced by rainfall in Rio de Janeiro City». *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 30, no. 1, p.85-94.
- D'Orsi, R. N. 2011. *Correlação entre pluviometria e escorregamentos no trecho da Serra dos Orgãos da Rodovia federal BR-116 RJ (Rio-Teresopolis)* [Corrélation entre la pluviométrie et les glissements de terrain sur le tronçon de l'Autoroute Fédérale BR-116 dans la Serra dos Orgãos RJ (Rio-Teresopolis)]. Thèse de doctorat, Rio de Janeiro, *Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 303 p.
- Dos Santos, L. A. F. 2007. *Angra dos Reis : Transformações socio-econômicas e mudanças demográficas* [Angra dos Reis : Transformations socio-économiques et changements démographiques]. In *V Encontro Nacional Sobre Imigração* [V<sup>e</sup> Rencontre sur l'Immigration] (Campinas, 15-17 octobre 2007), sous la dir. de A. T. R. de Oliveira et J. I. R. Rigotti, 26 p. Belo Horizonte : abep.
- Duc, D. M. 2013. «Rainfall-triggered large landslides on 15 December 2005 in Van Canh District, Binh Dinh Province, Vietnam». *Landslides*, vol. 10, no. 2, p. 219-230.
- Elbachá, A. T., L. E. P. Camios et R. F. C. Bahiar. 1992. *Tentativa de correlação entre precipitação e deslizamentos na cidade de Salvador* [Tentative de corrélation entre les précipitations et les glissements de terrain dans la ville de Salvador]. In *1<sup>a</sup> Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE)* (Rio de Janeiro, 3-5 novembre 1992), p. 647-673. Rio de Janeiro : ABMS.
- Eletronuclear. 2005. Voir Brésil, Eletrobras, Eletronuclear. 2005.
- Endo, T. 1970. «Probable distribution of the amount of rainfall causing landslides». *Hokkaido Branch*, rapport annuel, p. 123-136.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2013. *ArcGIS*, version 10.2 (PC, 2 GB RAM). Redland: Environmental Systems Research Institute.
- Feijó, R. L., N. M. Paes et R. N. d'Orsi. 2001. *Chuvas e movimentos de massa no município do Rio de Janeiro* [Pluies et mouvements de masse dans la municipalité de Rio de Janeiro]. In *3<sup>a</sup> Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE)* (Rio de Janeiro, 28-30 novembre 2001), p. 223-230. São Paulo : ABMS.
- Fernandes, N. F., R. F. Guimarães, R. A. T. Gomes, B. C. Vieira, D. R. Montgomery et H. Greenberg. 2004. «Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling». *Catena*, vol. 55, no. 2, p.163-181.
- Ferrari, A., et K. Mansur. 2012. *Ponto de Interesse Geológico : Serra do Mar* [Point d'intérêt géologique: Serra do Mar]. Rio de Janeiro : Projeto Caminhos Geológicos.
- Floris, M., M. Mari, R. W. Romeo et U. Gori. 2004. «Modelling of Landslide-Triggering Factors – A Case Study in the Northern Apennines, Italy». In *Lecture Notes in Earth Sciences 104: Engineering Geology for Infrastructures Planning in Europe*, sous la dir. de R. Hack, R. Azzam et R. Charlier, p. 745-753. Berlin: Springer.



- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. *Forest and landslide: The role of trees and forests in the prevention of landslides and rehabilitation of landslide-affected areas in Asia*. Bangkok: RAP publications, 70 p.
- Frattoni, P., G. B. Crosta et R. Sosio. 2009. «Approaches for defining thresholds and return periods for rainfall-triggered shallow landslides». *Hydrological Processes*, vol. 23, no. 10, p. 1444-1460.
- Fundação brasileira para o desenvolvimento sustentável [Fondation brésilienne pour le développement durable] [FBDS]. 2009. *Climate change and extreme events in Brazil*. São Paulo: Lloyds, 39 p.
- Fúrian, S., L. Barbiéro et R. Boulet. 1999. «Organization of the soil mantle in tropical southeastern Brazil (Serra do Mar) in relation to landslides processes». *Catena*, vol. 38, no. 1, p. 65-83.
- Gabet, E. J., D. W. Burbank, J. Putkonen, B. A. Pratt-Sitaula et T. Ojha. 2004. «Rainfall thresholds for landsliding in the Himalayas of Nepal». *Geomorphology*, vol. 63, no. 3-4, p. 131-143.
- Gariano, S. L., M. T. Brunetti, G. Ivone, M. Melillo, S. Peruccacci, O. Terranova, C. Vennari et F. Guzzetti. 2015. «Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy». *Geomorphology*, vol. 228, p. 653-665.
- Giannecchini, R. 2006. «Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alpas (Italy)». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 6, no. 3, p. 357-364.
- Giannecchini, R., Y. Galanti et G. D'Amato Avanzi. 2012. «Critical rainfall thresholds for triggering shallow landslides in the Serchio River Valley (Tuscany, Italy)». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 12, no. 3, p. 829-842.
- Givord, P., et X. D'Haulfoeuille. 2013. *La régression quantile en pratique*. Paris : Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE), 44 p.
- Glade, T., et M. J. Crozier. 2005. «The nature of landslide hazard impact». In *Landslide Hazard and Risk*, sous la dir. de T. Glade, M. Anderson et M. J. Crozier, p. 41-74. Chichester : Wiley.
- Glade, T., M. J. Crozier et P. Smith. 2000. «Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using empirical Antecedent Daily Rainfall Model». *Pure and Applied Geophysics*, vol. 157, no. 6-8, p. 1059-1079.
- Godt, J. W., R. L. Baum et A. F. Chleborad. 2006. «Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 31, no. 1, p. 97-110.

- Govi, M., et P.F. Sorzana. 1980. «Landslide susceptibility as function of critical rainfall amount in Piedmon basin (Northwester Italy)». *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, vol. 14, p. 43-60.
- Guerra, A. J. T., et J. K. Mendonça. 2004. *Erosão dos solos e a questão ambiental* [Érosion des sols et la question environnementale]. In *Reflexões sobre a geografia física no Brasil* [Réflexions sur la géographie physique au Brésil], sous la dir. de A. C. Vitte et A. J. T. Guerra, p. 225-256. Rio de Janeiro : Bertrand Brasil.
- Guerra, A. J. T., J. F. R. Bezerra, M. D. C. O. Jorge et M. A. Fullen. 2013. «The geomorphology of Angra dos Reis and Paraty Municipalities, Southern Rio de Janeiro State». *Revista Geonorte*, vol. 8, no. 1, p. 1-21.
- Guidicini, G., et O. Y. Iwasa. 1977. «Essai de corrélation entre la pluviosité et les glissements de terrain sous climat tropical humide». *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, no. 16, p.13-20.
- Guzzetti, F., S. Peruccacci, M. Rossi et C. P. Stark. 2007. «Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe». *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 98, no. 3-4, p.239-267.
- , 2008. «The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update». *Landslides*, vol. 5, no. 1, p. 3-17.
- Hasegawa, S., M. Yamanaka, R. K. Dahal, N. P. Bhandary et R. Yatabe. 2010. «Rainfall-induced landslides in different climatic environments – a comparison of the Nepal Himalaya and Shikoku, Japan». In *11<sup>th</sup> International Association of Engineering Geology Conference: Geologically Active* (Auckland, 5-10 septembre 2010), sous la dir. de A. L. Williams, G. M. Pinches, C. Y. Chin, T. J. Mcmorran et C. I. Massey, p. 241-249. Londres: Taylor & Francis Group.
- Heilbron, M., C. D. M. Valeriano, C. S. Valladares et N. Machado. 1995. *A orogênese Brasileira no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil* [L'orogénèse Brésilienne dans le segment central du couloir Ribeira, Brésil]. *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 25, no. 4, p. 249-266.
- Heilbron, M., A. C. Pedrosa-Soares, M. D. C. C. Neto, L. C. da Silva, R. A. J. Trouw et V. De Assis Janasi. 2004. *Província Mantiqueira* [Province Mantiqueira]. In *Geologia do Continente Sul Americano : Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* [Géologie du continent sud-américain : Évolution du travail de Fernando Flávio Marques de Almeida], sous la dir. de V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro et B. B. de Brito Neves, p. 203-234. São Paulo : Beca Produções Culturais Ltda.

- Heyerdahl, H., C. B. Harbitz, U. Domaas, F. Sandersen, K. Tronstad, F. Nowacki, A. Engen, O. Kjekstad, G. Dévoli, S. G. Buezo, M. R. Diaz et W. Hernandez. 2003. «Rainfall induced lahars in volcanic debris in Nicaragua and El Salvador: practical mitigation». In *Proceedings of the International Conference on Fast Slope Movements – Prediction and Prevention for risk Mitigation* (Naples, 12-16 mai 2003), p. 275-282. Naples: Pàtron Editore.
- Highland, L. M., et P. Bobrowsky. 2008. «The landslide handbook – A guide to understanding landslides». *U.S. Geological Survey*, circular 1325, 129 p.
- Hugget, R. J. 2011. «What is geomorphology?». Chap. in *Fundamentals of geomorphology*, p. 3-18. Londres: Routledge.
- IBGE (*Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* [Institut Brésilien de Géographie et Statistique]. 2014. Base de données en ligne. (<http://www.ibge.gov.br/home/>). Consulté le 13 janvier 2014.
- INEA (*Instituto Estadual do Ambiente* [Institut Étatique de l'Environnement]. 2013. Base de données en ligne. Rio de Janeiro, *Sistema de Alerta de Cheias* [Système d'alerte de crues]. (<http://inea.infoper.net/inea/>). Consulté le 22 août 2014.
- Infoglobo. 2013. *Na virada do ano, temporal causa 53 mortes em Angra dos Reis* [Au début de l'année, le temps cause 53 décès à Angra dos Reis], *Acervo O Globo*, 28 juillet, [En ligne]. (<http://acervo.oglobo.globo.com/rio-de-historias/na-virada-do-ano-temporal-causa-53-mortes-em-angra-dos-reis-9244851>). Consulté le 20 janvier 2014.
- Innes, J. L. 1983. «Debris flows». *Progress in Physical Geography*, vol. 7, no. 4, p. 469-501.
- Intergovernmental panel on climate change [IPCC]. 2012. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. New York: Cambridge University Press, 594 p.
- Iverson, R. 2000. «Landslide triggering by rain infiltration». *Water Resources Research*, vol. 36, no. 7, p. 1897-1910.
- Jakob, M., et H. Weatherly. 2003. «A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia». *Geomorphology*, vol. 54, no. 3-4, p. 137-156.
- Jan, C. D., et C. L. Chen. 2005. «Debris flows caused by Typhoon Herb in Taiwan». In *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, sous la dir. de M. Jakob et O. Hungr, p. 363-385. Chichester: Praxis.
- Jibson, R. W. 1989. «Debris flow in southern Puerto Rico». *Geological Society of America*, special paper 236, p. 29-55.
- Jones, F. O. 1973. «Landslides in Rio de Janeiro and the Serra das Araras Escarpment, Brazil». *U.S. Geological Survey Professional Paper* 697, 42 p.



- Junior, A. F. D. A. 2007. *Mapeamento geotécnico aplicado a análise de processos de movimentos de massa gravitacionais : Costa Verde – RJ – Escala 1 : 10.000* [Cartographie géotechnique appliquée à l'analyse du processus de mouvements de masse gravitationels : Costa Verde – RJ – Échelle 1 : 10.000]. Mémoire de maîtrise, São Carlo, *Universidade de São Paulo*, 210 p.
- Kanji, M. A., F. Massad et P. T. Cruz. 2003. «Debris flow in areas of residual soils: occurrence and characteristics». In *International Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flows in natural Slopes and Earthfills* (Sorrento, 14-16 mai 2003), sous la dir. de L. Picarelli, p. 1-11. Bologne: Pàtron Editore.
- Kanungo, D. P. et S. Sharma. 2014. «Rainfall thresholds for prediction of shallow landslides around Chamoli-Joshimath region, Garhwal Himalayas, India». *Landslides*, vol. 11, no. 4, p. 629-638.
- Keefer, D. K., R. C. Wilson, R. K. Mark, E. E. Brabb, W. M. Brown III, S. D. Ellen, E. L. Harp, G.F. Wieczorek, C.S. Alger et R.S. Zarkin. 1987. «Real-time landslide warning system during heavy rainfall». *Science*, vol. 238, no. 4829, p. 921-925.
- Kim, S. K., W. P. Hong et Y. M. Kim. 1991. «Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea». In *Landslides*, sous la dir. de D. H. Bell, vol. 2, p. 989-994. Rotterdam : A.A. Balkema.
- Kleinbaum, D. G., et M. Klein. 2010. *Logistic Regression: A self-learning text*. Springer: New York, 702 p.
- Koenker, R. 2012. *Quantile Regression in R: A vignette*, [En ligne]. (<http://www.econ.uiuc.edu/~roger/research/rq/vig.pdf>). Consulté le 21 février 2014.
- Koenker, R., et K. F. Hallock. 2001. «Quantile Regression». *Journal of Economic Perspectives*, vol. 15, no. 4, p. 143-156.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf et F. Rubel. 2006. «World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated». *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 15, no. 3, p.259-263.
- Larsen, M. C., et A. Simon. 1993. «A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico». *Geografiska Annaler*, vol. 75, no. 1-2, p. 13-23.
- Larsen, M. C., et A. J. Torres-Sánchez. 1998. «The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico». *Geomorphology*, vol. 24, no. 4, p. 309-331.
- Marchi, L., N. Arattano et M. A. Deganutti. 2002. «Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent». *Geomorphology*, vol. 46, no. 1-2, p. 1-17.

- Marques, R., J. Zêzere, R. Trigo, J. Gaspar et L. Trigo. 2008. «Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoação County (São Miguel Island, Azores): relationships with the North Atlantic Oscillation». *Hydrological Processes*, vol. 22, no. 4, p. 478-494.
- Martelloni, G., S. Segoni, R. Fanti et F. Catani. 2012. «Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence». *Landslides*, vol. 9, no. 4, p. 485-495.
- Mathew, J., V. K. Jha et G. S. Rawat. 2009. «Landslide susceptibility zonation mapping and its validation in part of Garhwal Lesser Himalaya, India, using binary logistic regression analysis and receiver operating characteristic curve method». *Landslide*, vol. 6, no. 1, p. 17-26.
- Mathew, J., D. G. Babu, S. Kundu, K. V. Kumar et C. C. Pant. 2013. «Integrating intensity-duration-based rainfall threshold and antecedent rainfall-based probability estimate towards generating early warning for rainfall-induced landslides in parts of the Garhwal Himalaya, India». *Landslides*, mai 2013, 14 p.
- Mazza, B. C. 2007. *Inventário de movimentos de massa gravitacionais na Serra do Mar no município de Angra dos Reis, Rio de Janeiro* [Inventaire des mouvements de masse gravitationels dans la Serra do Mar dans la municipalité d'Angra dos Reis, Rio de Janeiro]. Rio de Janeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Geociências, monographie de graduation, 38 p.
- MIC. 2006. Voir Brésil, ministère des villes [MIC]. 2006.
- Montgomery, D. R., et W. E. Dietrich. 1994. «A physically based model for the topographic control on shallow landsliding». *Water Resources Research*, vol. 30, no. 4, p. 1153-1171.
- Montgomery, D. R., K. M. Schmidt, H. M. Greenberg et W. E. Dietrich. 2000. «Forest clearing and regional landsliding». *Geology*, vol. 28, no. 4, p. 311-314
- Moser, M., et F. Hohensinn. 1983. «Geotechnical aspects of soils slips in Alpine regions». *Engineering Geology*, vol. 19, no. 3, p. 185-211.
- Nadim, F., O. Kjekstad, P. Peduzzi, C. Herold et C. Jaedicke. 2006. «Global landslide and avalanche hotspots». *Landslide*, vol. 3, no. 2, p. 159-173.
- Nadim, F., J. Cepeda, F. Sandersen, C. Jaedicke et H. Heyerdahl. 2009. «Prediction of rainfall-induced landslides through empirical and numerical models». In *Rainfall-induced landslides: mechanisms, monitoring techniques and nowcasting models for early-warning systems*, sous la dir. de L. Picarelli, p. 1-10. Naples: CIRIAM.
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. 2014. *El Nino/Southern Oscillation (ENSO): cold & warm episodes by season*. [En ligne]. ([http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)). Consulté le 14 octobre 2014.

- Nilson, T. H., et B. L. Turner. 1975 «Influence of rainfall and ancient landslides deposits on recent landslides (1950-1971) in urban areas of Contra Costa County, California». *U.S. Geological Survey*, bulletin 1388, 18 p.
- Nimer, E. 1989. *Climatologia do Brasil* [Climatologie du Brésil], 2<sup>e</sup> édition, volume 4. Rio de Janeiro : SUPREN/IBGE, 421 p.
- Nunes, A. J. C. 1979. *Relatório Tecnossolo RE 1440/79 (20.2) de 5/4/1979* [Rapport Tecnossolo RE 1440-79 (20.2) du 5 avril 1979]. Engenharia e Tecnologia de Solos e Materiais S.A., 4 p.
- Nunes, L. H., et R. P. Modesto. 1992. *Comportamento pluviométrico nos municípios atendidos pelo plano preventivo de defesa civil – PPDC* [Comportement pluviométrique dans les municipalités visées par le plan de prévention de la défense civile – PPDC] *Revista do Instituto Geológico de São Paulo*, vol. 13, no. 1, p. 47-57.
- O Fluminense. 2013. *Angra dos Reis recebe pluviômetros para a prevenção de tragédias* [Angra dos Reis reçoit des pluviomètres pour la prévention de tragédies]. *Grupo O Fluminense*, 23 juin, [En ligne]. (<http://www.ofluminense.com.br/editorias/cidades/angra-recebe-novos-pluviometros>). Consulté le 10 novembre 2014.
- Onodera, T., R. Yoshinaka et H. Kazama. 1974. «Slope failures caused by heavy rainfall in Japan». In *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Congress of the International Association of Engineering Geology* (São Paulo, 18-24 août 1974), p. 1-10. São Paulo: Springer-Verlag.
- Ortigão, J. A. R., M. G. Justi, R. D'Orsi et H. Brito. 2001. «Rio-Watch 2001 : the Rio de Janeiro landslide alarm system». In *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Southeast Asian Geotechnical Conference* (Hong Kong, 10-14 décembre 2001), sous la dir. de Ho et Li, p. 273-241. Hong Kong: A.A. Balkema.
- Parizzi, M. G., C. S. Sebastião, C. De Sanctis Viana, M. C. Pflueger, L. C. Campos, J. M. D. Cajazeiro, R. S. Tomich, R. N. Guimarães, M. L. De Abreu, F. G. Sobreira et R. Dos Reis. 2010. *Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG* [Corrélation entre précipitations et mouvements de masse dans la municipalité de Belo Horizonte, MG]. *Geografias*, vol. 6, no. 2, p. 49-68.
- Park, H.-A. 2013. «An introduction to logistic regression: From basic concepts to interpretation with particular attention to nursing domain». *Journal of Korean Academy of Nursing*, vol. 43, no. 2, p. 154-164.
- Pasuto, A., et S. Silvano. 1998. «Rainfall as a trigger of shallow mass movements. A Case Study in the Dolomites, Italy». *Environmental Geology*, vol. 35, no. 2-3, p. 184-189.
- Pedrosa-Soares, A. C., et C. Wiedemann-Leonardos. 2000. «Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, eastern Brazil». In *Tectonic Evolution of South America*, sous la dir. de U. G. Cordani, E. J. Milani, A. T. Filho et D. A. Campos, p. 265-285. Rio de Janeiro.



- Pereira, S., et J. L. Zêzere. 2012. «Empirically-based rainfall thresholds for debris flow occurrence in the North of Portugal». In *XII Reunión Nacional de Geomorfología* (Cantabria, 17-20 septembre 2012), sous la dir. de A.G. Diez, p. 109-112. Cantabria: PubliCan Ediciones.
- Peruccacci, S., M. T. Brunetti, S. Luciani, C. Vennari et F. Guzzetti. 2012. «Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy». *Geomorphology*, vol. 139-140, p. 79-90.
- Pocidonio, E. A. L., et T. M. da Silva. 2011. «Nature as attraction and repulsion in the city of Angra dos Reis, Rio de Janeiro State». *Geo UERJ*, vol. 2, no. 22, p. 422-446.
- Polemio, M., et O. Petrucci. 2000. «Rainfall as a landslide triggering factor: an overview of recent international research». In *Landslides in Research, Theory and Practice*, sous la dir. de E. Bromhead, N. Dixon et M. Ibsen, p. 1219-1226. Londres : Thomas Telford.
- Rahardjo, H., X. W. Li, D. G. Toll et E. C. Leong. 2001 «The effect of antecedent rainfall on slope stability». *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 19, no. 3-4, p. 371-399.
- Rahardjo, H., E. G. Leong et R. B. Rezaur. 2008. «Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall». *Hydrological Processes*, vol. 22, no. 4, p. 506-523.
- Raia, S., M. Alvioli, M. Rossi, R.L. Baum, J. W. Godt et F. Guzzetti. 2013. «Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslides models: a probabilistic approach». *Geoscientific Model Development Discussions*, vol. 6, no. 1, p. 1367-1426.
- Reichenbach, P., M. Cardinali, P. De Vita et F. Guzzetti. 1998. «Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy)». *Environmental Geology*, vol. 35, no. 2-3, p. 146-159.
- Ribeiro, M. F., V. C. Da Costa, N. M. Neto et M. A. V. De Freitas. 2013. «An analysis of monthly rainfall and its relationship to the occurrence of mass movement and flooding in Pedra Branca Massif in the city of Rio de Janeiro, Brazil». *Geographical Research*, vol. 51, no. 4, p. 398-411.
- Ritter, D. F., R. C. Kochel et J. R. Miller. 2006. *Process Geomorphology*. Long Grove: Waveland Press, 560 p.
- Rohli, R. V., et A. J. Vega. 2008. «Introduction to climatology». Chap. in *Climatology*, p. 3-12. Londres: Jones and Bartlett Publishers.
- Rosi, A., S. Segoni, F. Catani et N. Casagli. 2012. «Statistical and environmental analyses for the definition of a regional rainfall threshold system for landslide triggering in Tuscany (Italy)». *Journal of Geographical Sciences*, vol. 22, no. 4, p. 617-629.

- RStudio. 2014. *RStudio: Integrated development environment for R*, version 0.98.1028 (PC, Windows NT 6.2). Logiciel en ligne. (<http://www.rstudio.com/>). Consulté le 10 janvier 2014.
- SafeLand. 2012. «Landslide triggering mechanisms in Europe – Overview and State of the Art». In *7<sup>th</sup> Framework Programme*, 378 p.
- Saito, H., D. Nakayama et H. Matsuyama, 2010. «Relationship between the initiation of shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in Japan». *Geomorphology*, vol. 118, no. 1-2, p. 167-175.
- Salarori, I. S. 2003. *Movimentos de massa no Município de Vitória – ES : Inventário, caracterização e indicativos de um modelo comportamental* [Mouvements de masse dans la municipalité de Vitória – ES : Inventaire, caractérisation et indicatifs d'un modèle comportamental]. Mémoire de maîtrise, Vitória, *Universidade Federal do Espírito Santo*, 148 p.
- Sandersen, F. S. Bakkehø, E. Hestnes et K. Lied. 1996. «The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass instability». In *Landslides: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium* (Trondheim, 17-21 juin 1996), sous la dir. de K. Senneset, p. 97-114. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Selby, M. J. 1993. *Hillslope materials and processes*. New York: Oxford University Press, 451 p.
- Soares, E. P. 2006. *Caracterização da precipitação na região de Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas* [Caractérisation des précipitations dans la région d'Angra dos Reis et sa relation avec l'occurrence de glissements de versants]. Rio de Janeiro, *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil*, mémoire de maîtrise, 163 p.
- Soares, F. S., C. N. Francisco et M. C. A. Senna. 2014. *Distribuição espaço-temporal da precipitação na região hidrográfica da Baía da Ilha Grande – RJ* [Distribution spatio-temporelle des précipitations dans la région hydrographique de la Baie de l'Ilha Grande]. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 29, no. 1, p. 125-138.
- Staley, D. M., J. W. Kean, S. H. Cannon, M. S. Kevin et J. L. Laber. 2012. «Objective definition of rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of post-fire debris flows in southern California». *Landslides*, vol. 10, no. 5, p. 547-562.
- Starkel, L. 1989. «The role of extreme meteorological events in the shaping of mountain relief». *Geographia Polonica*, vol. 41, p. 13-20.
- Talebi, A., A. R. Nafarzadegan et H. Malekinezhad. 2010. «A review of empirical and physically based modeling of rainfall triggered landslides». *Physical Geography Research Quarterly*, no. 70, p. 45-64.

- Tatizana, C., M. Ogura, M., Rocha et L. E. S. Cerri. 1987. *Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos, Serra do Mar, Município de Cubatão* [Analyse de la corrélation entre les pluies et les glissements, Serra do Mar, Municipalité de Cubatão]. In *5º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia* (São Paulo, 4-8 octobre 1987), p. 225-236. São Paulo: ABGE.
- Tavares, R., J. L. Sant'Anna Neto, J. T. G. Tommaselli, M. M. N. Pressinotti et J. Santoro. 2004. *Análise da variabilidade temporal e espacial das chuvas associada aos movimentos de massa no litoral norte paulista* [Analyse de la variabilité temporelle et spatiale des pluies associées aux mouvements de masse sur le littoral nord de l'État de São Paulo]. In *1º Simpósio Brasileiro de desastres naturais* (Florianópolis, 27-30 septembre 2004), p. 680-696. Florianópolis : GEDN/UFSC.
- Teixeira, N. C. et C. D. C. Guimarães. 2012. *Métodos de contenção e estabilização de processos erosivos avançados e voçorocas no Brasil* [Méthodes de soutènement et de stabilisation des processus érosifs avancés et de ravinement au Brésil]. *Publicações da UFSJ*, octobre, p. 1-14.
- Terlien, M. T. J. 1998. «The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds». *Environmental Geology*, vol. 35, no. 2-3, p. 124-130.
- Thiessen, A. J., et J. C. Alter. 1911. «Precipitation averages for larges areas». *Monthly Weather Review*, vol. 39, p. 1082-1084.
- Tiranti, D. et D. Rabuffetti. 2010. «Estimation of rainfall thresholds triggering shallow landslides for an operational warning system implementation». *Landslides*, vol. 7, no. 4, p. 471-481.
- Tricart, J. L. F. 1979. «Altération et dissection différentielles dans un socle cratonisé. L'exemple de la dorsale brésilienne». *Annales de Géographie*, vol. 88, no. 487, p. 265-314.
- Tuñgol, N. M., et T. M. Regalado. 1996. «Rainfall, acoustic flow monitor records, and observed lahars of the Sacobia River in 1992». In *Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo*, sous la dir. de C. G. Newman et R. S. Punongbayan, 1126 p. Seattle: Washington University Press.
- Tupinambá, M., M. Heilbron, B. P. Duarte, J. R. Nogueira, C. Valladares, J. Almeida, L. G. do Eirado Silva, S. R. de Medeiros, C. G. de Almeida, A. Miranda, C. D. Ragatky, J. Mender et I. Ludka. 2007. *Geologia da Faixa Ribeira setentrional : Estado do arte e conexões com a Faixa Araçuaí* [Géologie du couloir Ribeira septentrional : État de l'art et connexions avec le couloir Araçuaí]. *Geonomos*, vol. 15, no. 1, p. 67-79.
- Vale do Aço. 2010. *Em 2002, 40 pessoas morreram após deslizamento em Angra* [En 2002, 40 personnes sont décédées après un glissement de terrain à Angra]. *Diário do Vale*, 1<sup>er</sup> janvier, [En ligne]. (<http://diariodovale.uol.com.br/noticias/0,14884.html#axzz2qxSd7ZQR>). Consultée le 20 janvier 2014.



- Van Westen, C. 2003. «Introduction to landslides – Part 1: Types and causes». *Asian Disaster Preparedness Center*, [En ligne]. ([http://www.adpc.net/casita/Course%20Modules/Landslide%20hazard%20assessment/Landslides\\_types\\_and\\_causes.pdf](http://www.adpc.net/casita/Course%20Modules/Landslide%20hazard%20assessment/Landslides_types_and_causes.pdf)). Consulté le 18 octobre 2013.
- Vennari, C., S. L. Gariano, L. Antronico, M. T. Brunetti, G. Ivone, S. Peruccacci, O. Terranova et F. Guzzetti. 2014. «Rainfall thresholds for shallow landslide occurrence in Calabria, southern Italy». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, no. 2, p. 317-330.
- Vieira, R. 2004. *Um olhar sobre a paisagem e o lugar como expressão do comportamento frente ao risco de deslizamento* [Un regard sur le paysage et le lieu comme expression du comportement face au risque de glissement de terrain]. Thèse de doctorat, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 197 p.
- Vieira, B. C., N. F. Fernandes et O. A. Filho. 2010. «Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, no. 9, p. 1829-1837.
- Wieczorek, G. F. 1987. «Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California». In *Debris flow/avalanches: Process, Recognition and Mitigation*, sous la dir. de J. E. Costa et G. F. Wieczorek, p. 93-104. Geological Society of America: Reviews in Engineering Geology, vol. 7.
- , 1996. «Landslide triggering mechanisms». In *Landslide: Investigation and Mitigation*, sous la dir. de A. K. Turner et R. L. Schuster, p. 325-362. Washington D.C.: National Academy Press.
- Wieczorek, G. F., et T. Glade. 2005. «Climatic factors influencing occurrence of debris flows». In *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, sous la dir. de M. Jakob et O. Hungr, p. 325-362. Chichester: Praxis.
- Wieczorek, G. F., B. A. Morgan et R. H. Campbell. 2000. «Debris-flow hazards in the Blue Ridge of Central Virginia». *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. 6, no. 1, p. 3-23.
- Wilson, R. C. 2000. «Climatic variations in rainfall thresholds for debris-flow activity». In *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Plinius Conference on Mediterranean Storms* (Maratea, 14-16 octobre 1999), sous la dir. de P. Claps et F. Siccaldi, p. 415-424. Cosenza: Editoriale Bios.
- Wilson, R. C., et G. F. Wieczorek. 1995. «Rainfall thresholds for the initiation of debris flow at La Honda, California». *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. 1, no. 1, p. 11-27.
- Wilson, R. C., J. D. Torikai et S. D. Ellen. 1992. «Development of rainfall warning thresholds for debris flows in the Honolulu district, Oahu». *U.S. Geological Survey*, open-file report 92-521, 45 p.

- Wolle, C. M., et W. Hachich. 1989. «Rain-induced landslides in south-eastern Brazil». In *12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Rio de Janeiro, 13-18 août 1989). Rotterdam : A.A. Balkema.
- WP/WLI (International Geotechnical Societies/Unesco Working Party on World Landslide Inventory). 1993. «Multilingual Landslide Glossary». *Bitech Publishers*, 32 p.
- Wu, W., et R. C. Sidle. 1995. «A distributed slope stability model for steep forested basins». *Water Resources Research*, vol. 31, no. 8, p. 2097-2110.
- Xavier, H. 1996. *Percepção geográfica dos deslizamentos de encostas em áreas de risco no município de Belo Horizonte, MG* [Perception géographique des glissements de terrain dans les zones à risque de la municipalité de Belo Hozironte, MG]. Thèse de doctorat, Rio Claro, *Universidade Estadual Paulista*, 222 p.
- Zêzere, J. L., et M. L. Rodrigues. 2002. «Rainfall thresholds for landsliding in Lisbon area (Portugal)». In *Landslides*, sous la dir. de J. Rybar, J. Stemberk et P. Wagner, p. 333-338. Lisse : A.A. Balkema.
- Zêzere, J. L., R. M. Trigo et I. F. Trigo. 2005. «Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): Assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 5, no. 3, p. 331-344.